# Die abtragende Kraft des Regens.

Dr. Hellmuth Theinert.

Rostock.
1933.

# Die abtragende Kraft des Regens.

## Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät der Universität Rostock

vorgelegt von

Hellmuth Theinert
aus Bolkenhain i. Schles.

Druck: Richard Aumann, Bolkenhain
1933.

Referent: Professor Dr. W. Ule.

Tag der mündlichen Prüfung: 18. 7. 1933.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinem lieben Vater.

# Die abtragende Kraft des Regens.

## Inhaltsverzeichnis:


| | Seite |
|---|---|
| Vorwort | VII |
| 1. Die mechanischen Regenwirkungen | 1 |
| a) Die Wirkung des Tropfens | 1 |
| Die Durchfeuchtung des Bodens | 8 |
| Das Verschlämmen des Bodens | 11 |
| Bodenbewegungen | 12 |
| b) Die flächenhafte Wirkung | 15 |
| Die mechanische Regenwirkung in Mulden und Dellen | 23 |
| Das Regenwasser in Tümpeln und Pfützen | 25 |
| c) Die rinnenhafte Wirkung | 26 |
| 2. Die chemische Regenwirkung | 28 |
| 3. Die Abtragungsmengen (Versuche und Messungen) | 30 |
| Die Bedingungen der Abspülung | 34 |
| Die Erklärung | 42 |
| Endformen | 54 |
| 4. Der Einfluß der Bodenbedeckung | 56 |
| Feld | 56 |
| Rasendecke | 59 |
| Wald | 59 |
| 5. Denudationsformen | 66 |
| Zusammenfassung der hauptsächlichsten Untersuchungsergebnisse | 70 |
| Literaturverzeichnis | 73 |

Tabelle 1: Abtragungen des Regens bei verschiedener Neigung der Fläche und Vegetationsbedeckung . . . . . 36
„ 2: Abtragungen durch den Wind . . . . . 41
„ 3: Abtragungen durch den Regen an den Pyramiden . 72

# Vorwort.

Vorliegende Arbeit stellt es sich zur Aufgabe, die abtragende Kraft des Regens zu untersuchen und namentlich durch eigene Versuche und Beobachtungen eine weitere Klärung der Grundprobleme der Abtragung durch den Regen herbeizuführen. Es zeigt sich nämlich, daß diese Vorgänge immer noch nicht genügend untersucht und geklärt sind, wie überhaupt der Regen als morphologisches Agens lange Zeit unterschätzt worden ist. Irgendwelche zusammenfassende Arbeiten existieren bis jetzt noch nicht, desgleichen experimentelle Untersuchungen.

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Professor Dr. W. Ule. Sie soll sich hauptsächlich auf eigene vom Verfasser angestellte Versuche und Messungen stützen, in welchem Maße die Abtragung durch den Regen auf der Erdoberfläche wirkt. Die Grundlage für alle Betrachtungen dürfte daher nur die Beobachtung sein, worunter in erster Linie die Beobachtung in der freien Natur zu verstehen wäre. Wir werden also bei unseren Untersuchungen vor die Aufgabe gestellt, auf dem Wege der induktiven Methode von einem verhältnismäßig reichhaltigen Beobachtungsmaterial zu physikalischen Erkenntnissen zu gelangen.

# 1. Die mechanischen Regenwirkungen.

## a) Die Wirkung des Tropfens.

Betrachten wir bei Beginn eines Regengusses die Regentropfen auf einer Sandfläche oder auf einem Stück eines vegetationslosen Feldes, so stellen wir fest, daß das Material durch die aufschlagenden Tropfen zunächst aufgelockert wird. — Wir können uns von der lebendigen Kraft des Regens eine Vorstellung machen, insofern, als wir die Endgeschwindigkeiten der Regentropfen je nach ihrem Durchmesser kennen. Sie sind verschiedentlich gemessen worden. In Hann's (Süring) Lehrbuch der Meteorologie 1926, Seite 322 finden wir folgende Tabelle angeführt:

Fallgeschwindigkeiten von Wassertropfen in der Luft:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r (in cm) . . . | 0,001 | 0,005 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,10 | 0,15 | 0,175 |
| v (cm/sek) . . | 1,3 | 26 | 78 | 180 | 426 | 583 | 691 | 740 |

Mit wachsendem Radius wächst die Fallgeschwindigkeit.

Bei größeren Tropfen tritt nach Lenard*) im Fallen eine Deformation des Tropfens ein. Sie bewirkt, daß vom Tropfenradius von 0,225 cm an ein Maximum der Fallgeschwindigkeit von 8 m/s erreicht wird, worauf die Fallgeschwindigkeit wieder abnimmt.

Der ganze Boden unterliegt, soweit er ein lockeres Gefüge besitzt, der mechanischen Auffschlagskraft des Regens, denn jeder Körper, der fällt, übt eine Druckwirkung, hervorgerufen durch seine eigene Schwerkraft, beim Auftreffen auf ein Hindernis aus. Unzählige Wassertröpfchen werden bei einem Regen gleichzeitig aus ihrer Gleichgewichtslage gebracht, d. h. sie überwinden den Widerstand der Luft,

*) Met. Z. 1904 Seite 254—61.

stürzen zur Erde, teils vergrößern sie sich im Fallen, wie wir noch sehen werden, indem benachbarte Tropfen in ihrer Bewegung sich vereinigen, wodurch die Geschwindigkeit vermehrt wird, teils werden sie durch allzu heftiges Aneinanderprallen ihre Größe verringern, sie werden zerspringen. Die Größe der Tropfen eines Regens wird nach der Kondensationsmöglichkeit sehr verschieden sein; sicher wird ein größerer Kondensationskern eine größere Wasserhülle um sich legen können. „Je dichter und mächtiger die Wolke ist, aus welcher der Regen herabfällt, zu desto bedeutenderen Größen können die Regentropfen anwachsen. Da die großen Tropfen rascher fallen als die kleineren, so werden diese zuerst am Boden anlangen: in der Tat beobachtet man, daß bei Beginn eines Gewitters die ersten Regentropfen die stärksten sind." *)

Im allgemeinen kann man feststellen, daß die Tropfen bei einem Regenfall in ihrer Größe recht verschieden sind. Lenard**) hat durch Beobachtungen die Größe der Tropfen festgestellt und sie gemischt gefunden. Ein wolkenbruchartiger Regen hat gleichzeitig Tropfengrößen von 0,5—5 mm Durchmesser geliefert.

Ob sich die Regentropfen beim Fallen gegenseitig beeinflussen, ist noch ein bestrittenes Problem.

„Daß ein größerer Tropfen im Herabfallen einen kleineren (der freilich langsamer fällt) einholt und mit ihm zusammenfließt, ist wenig wahrscheinlich, weil vor dem fallenden Tropfen eine Luftverdichtung entsteht und die Luft samt darin befindlichen Tröpfchen zum seitlichen Abfließen veranlaßt" ***) Defant†) fand beim Messen der Regentropfen, daß bei allen Regenfällen gewisse Tropfengrößen in einer besonders großen Zahl vorherrschen. Sehr häufig stehen die Gewichte der Tropfen zueinander im Verhältnis der Zahlen 1 : 2 : 4 : 8. Es scheint demnach, als ob mit Vorzug gleich große und schwere Tropfen eher zusammenfließen als Tropfen von verschiedener Größe.

W. Schmidt††) ist ebenfalls der Meinung, daß vorwiegend nur Tropfen zusammenfließen können, die nebeneinander mit gleicher Geschwindigkeit fallen. Ihre Vereinigung kann aber nur stattfinden, wenn die an der Oberfläche haftende und sie trennende Luftschicht Zeit zum Entweichen hat. Dies setzt das Vorhandensein einer wenn

*) Hann: Lehrbuch d. Met. 1926, Seite 321, 4. Aufl. Leipzig.
**) Lenard: Met. Z. 1904, S. 254/61, Tab. S. 259.
***) R. Börnstein: Leitfaden d. Wetterkunde 1913, S. 107.
†) Defant: Größe der Regentropfen. Met. Z. 22, 1905, S. 107.
††) W. Schmidt: Zusammenfließen der Regentropfen. Met. Z. 25, 1908, S. 107.

auch geringen Kraft voraus, die die sofortige Trennung der Tröpfchen hindert. Eine solche Kraft findet Schmidt in der Einwirkung des fallenden Tropfens auf die umgebende Luft, deren Strömungen die beiden sinkenden Tröpfchen gegeneinander treiben.

Der Größe und Schwere der Wassertropfen entsprechend ist ihre Wirkung auf die Erdoberfläche sehr verschieden groß. Wir dürfen sie nicht überschätzen. Wir kennen die starken tropischen Regenfälle, die als Zenithalregen, als plötzliche und schwere Güsse auftreten. Nach der herrschenden Meinung ist die Gewalt dieser Regenfälle so groß, daß sie imstande ist, Beschädigungen an den Gewächsen, die als gewöhnliche Vorkommnisse gelten, anzurichten. Es haben sich die bedeutendsten Botaniker auf Grund eigener Beobachtungen in diesem Sinne ausgesprochen. (Haberlandt, Junger.) — J. Wiesner*) gelangt zu ganz anderen Ergebnissen, nachdem er sehr interessante Versuche über die Kraft des tropischen Regens angestellt hat. Nach seiner Berechnung ist die Kraft und die Größe des Regentropfens gar nicht so groß und mächtig, wie bisher angenommen wurde. Er hat die Tropfengröße und Gewichte bei künstlichen und natürlichen Regen (Tropen) beobachtet und gemessen.

Wiesner fand bei künstlichem Regen für Tropfen, die aus einer Höhe von mehr als 5 m niederfielen, ein Höchstgewicht von 0,2 g. Bei den schwersten tropischen Gewittern in Buitenzorg fand er nur 1,6 g. Er berechnete ferner, daß Wassertropfen von 0,01 bis 0,25 g Gewicht mit einer annähernd gleichen Geschwindigkeit, etwa 7 m in der Sekunde, niederfallen. — Die lebendige Kraft der fallenden Regentropfen wäre bei einem Gewicht von 0,2 g im Augenblick des Aufschlagens auf den Boden etwa 0,0005 kg/m, bei 0,16 g Gewicht 0,0004 kg/m.

Als Vergleich der Wirkung eines Stoßes von 0,0004 kg/m lebendiger Kraft sieht Wiesner eine Bleikugel von 2 g nach einem Fall aus etwa 20 cm Höhe. — Die Tropfen fallen auch nicht so oft, wie man annehmen könnte. Bei den stärksten tropischen Regengüssen, die von Wiesner beobachtet wurden, fielen auf eine 100 $cm^2$ große Fläche kaum mehr als 6 schwere Tropfen in der Sekunde, ja im Durchschnitt noch weniger. Es ist eine sehr geringe Zahl. Die relative Größe des Regendruckes ist ebenfalls nur gering. Nach Wiesner ist der stärkste Druck eines natürlichen Regens ungefähr 8 mal geringer als der einer 3 m hochstehenden Brause.

Ein kleinerer Regentropfen hat wegen seines kleineren Gewichtes eine geringere Aufschlagskraft oder Druckwirkung. Daraus können

*) J. Wiesner: Beiträge zur Kenntnis des tropischen Regens. Sitz. Ber. d. Akad. d. Wiss. Wien 1895. Abt. 1, Bd. 104, S. 1397.

wir folgern, daß auch ein kleintropfiger Regen zunächst, als Summe der einzelnen Regentropfen, eine seiner Größe entsprechende geringere mechanische Wirkung auf den Erdboden ausübt als ein großtropfiger Regen. Dies äußert sich, wie wir später noch sehen werden, in einer geringeren Auflockerungsmenge und, wenn der Erdboden geneigt und die Regenmenge eine ausreichende ist, in einer geringeren Abtragungsmenge. Dies beweisen uns die Messungen in Abschnitt 3 dieser Arbeit. (Vergl. Tab. 3 am Schluß.) Es zeigt sich sehr deutlich, daß die Flächen bei einem Gewitterregen infolge der Größe der Tropfen und der Regenmenge mehr angegriffen und abgetragen werden als bei einem Landregen.

Die Wirkung des Regentropfens wäre noch eine viel größere, wenn dieser nicht in seinem Fallen den Reibungswiderstand der Luft zu überwinden hätte; ein anderer fester Körper von dem Gewicht eines Regentropfens würde mit viel größerer Geschwindigkeit und Druck den Erdboden erreichen. Es hängt dies mit dem flüssigen Zustande des Regentropfens zusammen. Beim Fallen erfährt der Tropfen eine Ausdehnung seiner Form, d. h. er wird in die Länge und Breite gezogen, seine Oberfläche wird vergrößert. Evtl. setzen die beim Durcheilen der Luft entstehenden Reibungskräfte die ganze Tropfenmasse in eine wirbelnde Bewegung. Dadurch setzt der Tropfen der Luft einen größeren Widerstand entgegen, sodaß die Geschwindigkeit verringert und die Fallbeschleunigung fast aufgehoben wird.

## Die Einwirkung der Regentropfen auf den Erdboden.

Wir wollen die verschiedene Wirkung des Regentropfens nach folgenden drei Gesichtspunkten kurz betrachten. 1) beim Aufschlagen auf schon lockeres Bodenmaterial, 2) beim Aufschlagen auf festes Material, 3) beim Aufschlagen auf eine in Bewegung befindliche dünne Wasserschicht, die flächenhaft über einen Körper abfließt, und die aus den Regentropfen entstanden ist.

Allgemein können wir die mechanische abtragende Kraft des Regens in zwei Komponenten zerlegen: 1. in die mehr oder weniger auflockernde Kraft des Regentropfens beim Aufschlagen auf die Erdoberfläche; 2. in die sich aus dem Abfließen der Wassermassen ergebende abspülende Wirkung. Beide Kräfte wirken bei jedem größeren Regenfall zusammen und bestimmen je nach den Umständen die Größe der Abspülung. Die mechanische Auflockerung geht der Abspülung voraus. Die beiden Kräfte entfalten ihre Hauptwirksamkeit in verschiedenen Zeiten, nicht gleichmäßig. Ist die Abspülung wirksam, so wird die mechanische Auflockerungskraft des Regens auf der Fläche fast aufgehoben.

Auf weichen, lockeren Boden schafft der Regentropfen je nach seiner Größe Eindrücke, die folgendermaßen erhalten werden: Durch die Wucht des Einschlages dringt der Tropfen in das Bodenmaterial ein und drängt die seiner Wassermasse im Wege liegenden Sand- bezw. Staubpartikel zur Seite. Es entsteht eine Höhlung, die von einem runden „Wall" von verdrängten und aufgelockerten Bodenteilchen umgeben wird. (Vergleiche Fig. 1 und 2.) Die Höhlung ist in ihrer Mitte etwas vertieft. Wir können diese Regeneindrücke bei Beginn eines Regens oder nach einem kurzen Regenfall beobachten. Der Verfasser erhielt dieselben Formen bei künstlichen und natürlichen Regen.

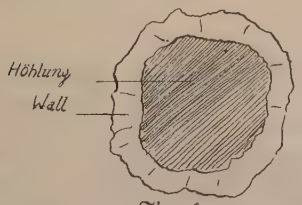


Fig. 1
von oben gesehen (schematisch)

Fig. 2
im Durchschnitt.

Größere Partikel, die wegen ihres größeren Gewichtes nicht zur Seite gedrängt werden können, werden nach meinen Beobachtungen in den Boden gestoßen und so zum Teil wieder verfestigt. Der gesamte Wassertropfen wird annähernd vom Boden aufgenommen, ohne daß sich der Tropfen zerteilt.

Anders werden sich die Tropfen auf hartem Gestein verhalten; hier zerfließen oder zerspringen sie, ohne irgend eine Spur einer mechanischen Wirkung zu hinterlassen. Sie schaffen nur sichtbare nasse Flecke auf dem Gestein durch die Wasserteilchen, die von der Gesteinsoberfläche aufgesaugt werden. — Auf geneigten Flächen werden sich gelegentlich die einzelnen zerspritzten Teile zu größeren Tropfen zusammenlegen, um dann über die Unterlage energielos hinabzugleiten und sich in irgendwelchen Unebenheiten anzusammeln.

Es ergäbe sich ein vollkommen gleichmäßiges Bild, wenn die Regentropfen auf lockerem Boden sich immer dieselben Einschlaglöcher aussuchen würden. Das ist, wie wir wissen, nicht der Fall. Dadurch werden die aus dem gelockerten Material geschaffenen „Wälle" zerstört, verwischt und noch mehr gelockert. Auch die zuerst geschlagenen Löcher werden verschnitten und unsichtbar, je mehr Regentropfen auf eine Fläche fallen, wie in Fig. 3 (S. 6) gezeigt wird. Schließlich verschwinden diese Gebilde vollkommen, die Oberfläche nimmt die Form einer gleichmäßig gelockerten Fläche, ohne

Einsenkungen und Unebenheiten, an. Ist die Bodenfläche geneigt und der Boden mit Regenwasser gesättigt, so daß ein flächenhaftes Ablaufen des Wassers stattfinden kann, so werden diese aufgelockerten Bodenpartikel zuerst und schnell abgespült.

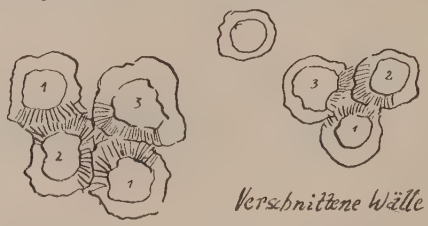


Fig. 3

Wir haben jetzt noch kurz die dritte Form der Regentropfenwirkung zu betrachten beim Auftreffen auf eine in Bewegung befindliche dünne Wasserschicht. Die Wirkung ist hier eine sehr geringe. — Einige sehr gute Beobachtungen und Messungen über die Energie des Regenwassers sind von O. Lehmann*) angestellt worden. Er trennt die Energie des Regenabflusses von der des Regenfalles und kommt zu folgenden Ergebnissen:

Die Energie der Regenfälle ist unbeteiligt an der Arbeit des abfließenden Wassers, einschließlich der Flächen- und Rillenbespülung; d. h. die Energie des Abflusses wird von der Energie der auffallenden Regentropfen keineswegs vergrößert. — Die Arbeitsfähigkeit eines jeden Abflusses wird ganz von der Erdoberfläche erzeugt und unter Umständen erst frei gemacht. — Mechanische Arbeitsleistungen des Regenwassers beim Aufschlagen vor Beginn des Abflusses sind nur in Lockermassen nachgewiesen und sonst nicht anzunehmen. —

Als Beispiel soll hier nur eine seiner Beobachtungen angeführt werden. Wir nehmen an, daß ein Gestein vom Regen ganz naß geworden ist. Der Regen war so schwach, daß ein Fließen der die Böschung überziehenden Wasserschicht nicht gleich oder nur unmerklich stattfindet. Die auffallenden Tropfen nehmen dann folgende Form an: „Der breitgewordene Tropfen bekommt eine Art sehr schwacher Randstufe, die nur langsam vergeht, während ein Wasserhügel vorauseilt. — Der sich auflösende sekundäre Tropfenhügel folgt dem Gefälle und fließt verzögert über die dünne Wasserhaut der Böschung; nach etwa 40 cm Weges legt er in Minuten nur noch mm zurück, und schließlich steht das ganz zerflossene

*) O. Lehmann: Ueber die Bewegungsenergie des Regenwassers. Zürich. Z. für Geomorph. 6. Heft, 1, 1930. S. 254.

Tropfengerinne im selben Sinne still wie die Wasserschicht. Die Energie des Tropfenhügels ist mit seinem Einsinken verbraucht. Deutlich scheidet sich hier der Abfluß infolge des Gefälles von dem Breitschlagen der gefallenen Tropfen im ersten Augenblick. Die Energie des freien Falles hatte nichts mit dem Abfluß zu tun."*)

Es würde zu weit führen, uns mit den Einzelheiten seiner Untersuchungen zu beschäftigen; wir begnügen uns mit den von ihm gefundenen Endresultaten. Daß mechanische Arbeitsleistungen des Regenwassers vor Beginn des Abflusses beim Aufschlagen nur in Lockermassen möglich sind, konnte ich durch meine Beobachtungen ebenfalls feststellen. — Nach den Untersuchungen von Lehmann findet eine mechanische Einwirkung der auffallenden Regentropfen auf den Boden einer Böschung, über die eine Wasserschicht hinweggleitet, nicht statt. Durch meine Beobachtungen an einer Sandfläche stellte ich jedoch fest, daß eine wenn auch sehr geringe Auflockerung des Bodenmaterials stattfindet, und daß dadurch eine gewisse Vermehrung der abgetragenen Massen vor sich geht. Daß die Regentropfen einen Druck auf den Erdboden bei einer fließenden dünnen Wasserschicht ausüben, kann man leicht beobachten und hören, wenn man bei einem kräftigen Gewitterregen unter einem Holzdach steht. Man hört das kräftige Aufschlagen der Tropfen, ein Trommeln, trotz der Wasserschicht, die über das Dach abrinnt. Diese Druckenergie muß unbedingt auf weiches Bodenmaterial auflockernd wirken, auch wenn sie von einer dünnen Wasserschicht überzogen wird.

Im allgemeinen ist bei allen Regenfällen die Regendauer von größter Bedeutung. Je länger ein Regen anhält, um so mehr wird ein Boden seinen Wirkungen unterliegen müssen. Das gilt für die Aufschlagskraft und abspülende Wirkung des Regenwassers wie auch für die Durchfeuchtung des Bodens und die evtl. später erfolgende Bewegung der Verwitterungs- bezw. Bodendecke. Neben der Regendauer spielt die Regenstärke eine wichtige Rolle. Ein kurzer und starker Regenfall wird, wie wir noch sehen werden, eine viel größere Abspülung zur Folge haben als ein langer und sanfter Regen. Bei dem ersten Fall werden die Regentropfen entsprechend größer sein und eine größere mechanische Wirkung hervorrufen. Die vermehrten Wassermassen vermögen den Boden stärker abzuspülen.

„Regenstärke und Regendauer zusammengenommen, ergeben

*) Lehmann: S. 239. Ueber die Bewegungsenergie des Regenwassers.

ein Bild von der auf der Oberfläche auftreffenden jeweiligen Regenmenge und ihrer Arbeitskraft.*)

## Die Durchfeuchtung des Bodens.

Jeder Regentropfen wird beim Aufschlagen den Erdboden durch seine Wassermenge befeuchten, ob er nun auf lockerem Boden eine sichtbare Aufschlagswirkung hinterläßt oder auf festem Gestein aufschlägt und zerplatzt. Wie wir in dem vorigen Abschnitt sahen, war dieser Vorgang eine Folge der Schwerkraft; letztere wird aber vom Regentropfen noch weiter ausgenutzt; da er an seinem Gewichte nichts verliert, sucht er, dem Gesetze der Schwere und dem Beharrungsvermögen folgend, aber unter Kraftverlust, noch weiter in die Tiefe des Bodens einzudringen und ihn bezw. das Gestein zu durchfeuchten. Die Erdoberfläche verhält sich je nach ihrer Beschaffenheit diesem Vorgang der Versickerung verschieden gegenüber. „Im Flachlande wird durch das geringe Gefälle die Versickerung des niedergeschlagenen Regens und des geschmolzenen Schneewassers befördert.**)

Der Boden vermag Wasser aufzunehmen und es längere oder kürzere Zeit festzuhalten. „Jeder Boden hat die Fähigkeit, eine seiner physikalischen Beschaffenheit (Korngröße) entsprechende größere oder geringere Wassermenge bis zur Sättigung festzuhalten, einen etwaigen Ueberschuß an Niederschlägen bei Vorhandensein eines durchlässigen Untergrundes in größere Tiefen absickern zu lassen, bis derselbe auf einer undurchlässigen Schicht als Grundwasser sich ansammelt und an einer geeigneten Stelle wieder zu Tage tritt.***)

Von größter Bedeutung für die Versickerung ist die Bodenart, d. h. die Wasserkapazität und Wasserleistungsfähigkeit. Die Geschwindigkeit der Versickerung und die Sickerwassermenge steigt mit der Größe des Durchmessers der Bodenteilchen und mit der Zahl der nicht kapillaren Hohlräume. Danach teilt Keilhack alle Gesteine je nach ihrer Wasserdurchlässigkeit oder Permeabilität ein:

1. Gesteine von überaus geringer Kapazität und Permeabilität = kristalline Gesteine. Sie vermögen Wasser nur in kapillarer Form als sogenannte Bergfeuchtigkeit aufzunehmen; demnach sind sie fast alle undurchlässig und sehr wenig wasseraufnahmefähig.

*) E. Bach: Ueber d. morph. Bedeut. d. Regens. 1915. S. 7.
**) H. Keller: Die Abflußerscheinungen in Mitteleuropa, S. 685. Geogr. Z. 1906.
***) E. Ebermayer: Der Einfluß der Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit usw. 1900. S. 29.

2. Gesteine von großer Kapazität, aber sehr geringer Permb.: Tone, Mergel, Torf, Braunkohle. Sie halten sich über ein gewisses Wasserquantum völlig undurchlässig, ihre Wasserkapazität nimmt mit zunehmender Korngröße ab.
3. Gesteine von großer Kap. und verhältnismäßig geringer Permb.: Schreibkreide, Dolomit.
4. Gesteine von großer Kap. und großer Permb.: Sand, Sandsteine, Löß, Konglomerate, Brekzien und Schutt.

Die Kapazität richtet sich, wie wir gesehen haben, nach der Porosität des Gesteins, die aus der Art und Weise der Zusammenlagerung der einzelnen Bodenbestandteile hervorgeht. Wir unterscheiden nach Ramann*) eine Einzelkornstruktur und eine Krümelstruktur der Bodenteilchen. Am einfachsten werden sich die Verhältnisse bei der Einzelkornstruktur gestalten, wenn Körner gleicher Größe regelmäßig nebeneinander gelagert sind und dadurch eine dichteste, bzw. lockerste Lagerung der Bodenteilchen ergeben. Je kleiner die Bodenkörner sind, je mehr Raum nehmen sie ein, je größer ist die Zahl der Zwischenräume und je größer ist die Oberfläche der Körnchen. In der Natur finden sich aber meist Bodenarten, die aus Bestandteilen verschiedener Größen bestehen; es werden sich hier die kleineren zwischen die größeren einlagern und so die Zwischenräume zwischen den einzelnen Teilen verringern. — Meist sind aber in unseren Böden die einzelnen Partikel mehr oder weniger zu Aggregaten vereinigt, sie bilden Krümel, poröse Klumpen, die gewissermaßen Körner zweiter Ordnung darstellen.

Das Porenvolumen beträgt bei Massengesteinen 0,25—0,85, bei dichten Kalksteinen 0,67—2,55, bei Sanden 30—42, bei Tonen bis 50 % des Gesamtvolumens. Die Zahlen beziehen sich auf kleine, völlig unverletzte Probestücke der betreffenden Gesteine.**) „Die Permeabilität größeren Gesteins jedoch hängt praktisch im wesentlichen nur von der Klüftigkeit ab. Fester Kalkstein ist trotz seiner geringen physikalischen Porosität meist hervorragend permeabel, da er infolge seiner Sprödigkeit bei gebirgsbildenden Bewegungen zahlreiche Klüfte erhalten hat, die dann durch die Lösung des Kalkes in kohlensäurehaltigem Wasser erweitert worden sind.“***)

Auf die Entstehung der Krümelstruktur im Boden wirken mehrere Faktoren ein.†) Es sind dies der Gehalt an löslichen Salzen, die Tätigkeit der Tierwelt, die Durchwurzelung des Bodens

*) Ramann: Bodenkunde, S. 221.
**) Lautensach: Allgem. Geogr. 1926. Seite 90.
***) „ „ „ „ 90.
†) Ramann: Seite 224.

durch Pflanzen und die Volumen-Veränderungen des Bodens durch physikalische Prozesse, sowie mechanische Bearbeitung der Böden. Uns interessiert aber nur, wie sich die einzelnen Bodenarten der Wasseraufnahme und der Durchfeuchtung gegenüber verhalten. — Ein Boden vermag Wasser aufzunehmen und es längere oder kürzere Zeit festzuhalten; das Maß für diese Fähigkeit ist die Wasserkapazität des Bodens, die durch die Größe und Menge der Kapillaren und damit verbundener Adhäsion bedingt ist. Das Regenwasser, das auf den Erdboden auftrifft, wird ihn nicht sofort passieren und durchdringen können, sondern es wird durch seine eigene Oberflächenspannung und durch die gegenseitigen molekularen Wirkungen zwischen Wasser und Boden daran mehr oder minder gehindert werden. An allen Berührungsstellen der Bodenpartikel bilden sich kapillar wirkende Räume, die das Wasser aufhalten. So können wir uns den Boden als ein zusammenhängendes Netz von Kapillaren vorstellen. Die Adhäsion steigt proportional der Oberfläche der Kapillaren und Hohlräume und wächst sehr bedeutend mit abnehmender Korngröße.*)

Tone, Lehme und Torf verhalten sich in ihrer Wasseraufnahmefähigkeit ganz anders als Sand. Die Korngröße der Lehmböden ist sehr gering, umso zahlreicher also werden ihre Kapillaren Hohlräume sein, die das Regenwasser aufhalten und so die große Wasserkapazität der Tone und Lehme verursachen. Sand hat eine sehr lockere Lagerung infolge seiner großen Partikel; bei ihnen herrschen hautsächlich kapillar nicht wirkende Hohlräume vor, woraus seine überaus große Permeabilität zu erklären ist. Man kann sich schon durch kleine einfache Versuche ohne genaue Messungen ein Bild von den verschiedenen Wasseraufnahmefähigkeiten der Böden machen, indem man gleiche Mengen von Sand und Lehm mit Wasser beträpfelt, und die Tropfen zählt bis zur Sättigung. Lehm kann bis zur vollständigen Sättigung beinahe dreimal so viel Wasser aufnehmen als Sand. — Die Durchlässigkeit des Bodens und seine wasserhaltende Kraft stehen im Gegensatz zueinander. Je durchlässiger ein Boden ist, je besser er oberflächliche Niederschläge aufnehmen kann, um so weniger ist er imstande, dieses Wasser zu halten und umgekehrt. — Wir haben also festgestellt, daß die Wasseraufnahmefähigkeit von der Partikelgröße der Bodenbestandteile abhängig ist. Je geringer sie ist, um so zahlreicher sind die kapillar wirkenden Hohlräume.

Wollny fand zum Beispiel folgende Größen der Wasserkapazität bei Quarzkörnern:

*) Ramann: Seite 242.

| Korngrößen | Volumen % | |
|---|---|---|
| 1—2 mm | 3,66 | |
| 0,25—0,50 mm | 4,38 | |
| 0,11—0,17 mm | 6,03 | |
| 0,01—0,07 mm | 35,50 | Wasserkap.*) |

Wir sehen, daß sich die Wasserkapazität bei Verringerung der Korngrößen infolge stärkerer Adhäsion vermehrt hat, fast um das Zehnfache.

Eine lockere Beschaffenheit der Bodenpartikel verursacht eine starke Wasserdurchlässigkeit des Bodens infolge des Ueberwiegens nicht kapillarwirkender Hohlräume. — Der Einfluß der Krümelbildung kann ein recht verschiedener sein, er kann kapillar wirken, wenn die Krümel von Poren durchsetzt sind, die das Wasser dauernd festhalten können. Meist findet eine Krümelung überwiegend bei feinkörnigen Bodenarten, wie Lehm und Ton, die kolloidale Stoffe enthalten, statt. Im allgemeinen werden Böden, die von der Einzelkorn- in die Krümelstruktur übergehen, in ihrer Wasserkapazität herabgesetzt durch die vielfach entstehenden nicht kapillaren Hohlräume**)

Wir haben jetzt die Durchfeuchtung des Bodens betrachtet, ohne irgendwelche Rücksicht auf eine Bedeckung des Bodens durch die Vegetation zu nehmen. Ihr Einfluß auf den Wasserhaushalt ist neben den physikalischen Eigenschaften recht bedeutend. Wie wir noch später sehen werden, trocknen Wälder und Kulturgewächse den Boden in der Wurzelregion durch den Wasserverbrauch der Wurzeln aus. Die Pflanzen brauchen während der Vegetationszeit zum Wachstum, zur Assimilation, zur Transpiration der Blätter usw. täglich sehr bedeutende Mengen, die nach Pflanzenart verschieden sind. Das Austrocknen des Bodens durch die Vegetation geschieht nicht allein durch die Wasseraufnahme der Wurzeln. Die Vegetationsdecke selbst hält eine gewisse Menge der Niederschläge zurück, und das um so mehr, je blattreicher und dichter sie ist. Dadurch erklärt sich, daß die immergrünen Nadelhölzer den Boden in höherem Maße austrocknen als die Laubhölzer, obwohl der Wasserverbrauch der Coniferen geringer ist als bei den Laubbäumen.

## Das Verschlämmen des Bodens.

Betrachten wir nach einem kräftigen Regenfall eine Sandfläche oder ein Stück eines Ackerfeldes, so können wir feststellen, daß das

*) Wollny: Forschungen der Agrikultur-Physik. 1895.
E. Ramann: Bodenkunde. Berlin 1905. S. 246.
**) Ramann: Bodenkunde. 1905. S. 247.

Bodenmaterial eine gewisse Festigkeit gegenüber trockenen Böden besitzt. Der Regen übt auf den Boden nach der mechanischen Auflockerung und Sättigung des Bodens einen Einfluß aus, der zu einer dichteren Zusammenlagerung der einzelnen Bodenteilchen führt. Bei einem kleinen Regenfall behält der Boden, wie ich beobachten konnte, seinen ursprünglichen Lockerheitsgrad, oder er wird noch mehr gelockert. Wir sahen in einem der vorhergehenden Kapitel, daß bei einem Regenfall die Partikel an der Erdoberfläche durch das Einschlagen der Regentropfen in Bewegung gesetzt werden. Bei einem kräftigen Regen sind die Wirkungen noch größer und sichtbarer, da die Tropfen durch ihr höheres Gewicht mit vermehrter Kraft auf den Boden niederfallen. Im anderen Falle wird das Wasser durch die starke Zufuhr nicht die Zeit haben, um sich in den Hohlräumen des Bodens nach unten vollständig zu verteilen. Es macht sich folgender Vorgang bemerkbar: Die einzelnen Bodenpartikel werden durch das nicht schnell genug einsickernde Wasser in Bewegung gebracht und in eine schlammförmige Masse verwandelt, die beim Austrocknen fester wird, sich dichter zusammenschließt. Dieser Vorgang ist für die Feuchtigkeit des Bodens sehr nachteilig, da er ein weiteres Eindringen des Wassers während eines Regens, bezw. vor einem Regen verhindert. — Oft wird die Wassermenge nur ausreichen, um die obersten Schichten des Bodens auf diese Art zu verschlämmen; bei folgender Austrocknung findet, wie man überall beobachten kann, eine Krustenbildung statt. Auf Ackerböden findet man sie sehr oft. Vorwiegend sind tonige und lehmige Böden der Verschlämmung ausgesetzt, und zwar leiden darunter mehr die mit Krümelstruktur als die mit Einzelkornstruktur ausgestatteten Böden.

Die Krustenbildungen sind nach Ramann Folgen der Volumenverminderung des Bodens durch Austrocknen in tonreichen und humosen Bodenarten. Ist die oberste Bodenschicht ausgetrocknet, so wird sie sich dadurch von den tieferliegenden Böden horizontal abheben, aber auch in vertikaler Richtung wird die Bodenoberfläche in verschieden große Stücke zerspringen.

## Die indirekte, mechanische Wirkung des Regens (Bodenbewegung).

In dem vorigen Kapitel wurde erwähnt, daß der Regen außer der mechanischen Aufschlagskraft und Durchfeuchtung des Bodens noch eine Wirkung ausübt, die sich in Bewegung der Verwitterungsdecke und der darunter liegenden Gesteinsschichten zeigt. Ich will

sie als indirekte mechanische Regenwirkung bezeichnen. Nach dem Regen dringt ein Teil des Wassers in den Erdboden ein, durchdringt und erfüllt die Poren des Gesteins, nach der Tiefe zu an Masse zunehmend. Die Zunahme der Wassermengen hängt nach Wollny*) mit der kapillaren Leitung zusammen. Bei einem Regen wird zunächst das Wasser nur von den feinsten Kapillaren festgehalten werden, weil sie wegen ihrer geringen Größe am leichtesten dem Druck der Wassersäule das Gleichgewicht zu halten imstande sind. Die größeren und größten Hohlräume werden sich, da sie der Schwere des Wassers einen geringen Widerstand entgegensetzen, entleeren und das Wasser nach unten abgeben. Sehr oft wird der Wassergehalt in der oberen Schicht größer sein als in der unteren, besonders wenn es sich um feinkörnige Bodenarten handelt. Die oberen Bodenschichten werden sich zunächst sättigen und das überschüssige Wasser allmählich an die unteren abgeben.

Bei der Durchfeuchtung der Bodenmasse tritt immer eine Beschwerung derselben ein. Tone, Lehme, Mergel usw., die im trockenen Zustande sehr fest sein können, verwandeln sich in Schlamm und beginnen unter dem Einfluß der Schwerkraft zu fließen, d. h. sie erweichen bei Wasseraufnahme. Jede Beschwerung eines Körpers ruft aber eine Aenderung seines Gleichgewichtes hervor. So wird auch die Erdoberfläche durch das auffallende und einsickernde Regenwasser eine Gleichgewichtsveränderung erfahren, und zwar bis in jene Tiefen, in welche das Regenwasser gelangt. Liegen schwere Bestandteile z. B. Gesteinstücke in tonigen Massen, werden sie durch das Wasser aufgeweicht, so haben die Gesteinstücke die Neigung, hinabzusinken und auf geneigten Gehängen der Schwerkraft folgend hinabzugleiten; je wasserreicher solche Schichten sind, um so beweglicher sind sie. Bei festen Gesteinmassen ist diese Gleichgewichtsveränderung, hervorgerufen durch den Regen, wegen ihrer großen Mächtigkeit und Festigkeit kaum zu merken. Dagegen spielt die Gleichgewichtsveränderung in der Verwitterungsdecke eine große Rolle in der morphologischen Gestaltung der Erdoberfläche. — „Stark zerklüftete Gesteine mit steilen Wänden neigen zum Abbrechen. Diese Neigung wird erhöht, wenn unter ihnen nachgiebige, leicht abspülbare Schichten liegen. Werden solche Schichten durch Wasseraufnahme weich und schlüpfrig, so wächst die Gefahr. Wenn nun aber gar die Schichten gegen den Abfall einfallen, dann können schwere, klüftige Felsmassen auf nassen, schlüpfrigen Schichten wie ein Schiff,

*) Wollny: Forschung der Agrik.-Physik. 1895. S. 32.

das auf der Gleitbahn von Stapel gelassen wird, ins Rutschen kommen." *)

Die entscheidende Rolle bei diesen Vorgängen spielt der Winkel des Gehänges, denn auf horizontalen Böden kann die Verwitterungsdecke nicht ins Rutschen geraten, sie kann höchstens einen Druck durch die Beschwerung mit Wasser auf die unter ihr liegenden Schichten ausüben. Bei geneigter Fläche dagegen gerät die Bodenmasse ins Gleiten und dies um so mehr, je größer der Neigungswinkel ist. Sie bewegt sich auf der Neigungsebene entlang und fließt solange hinab, bis die Abnahme des Gefälles und die Zunahme der inneren Reibung die Bewegung zum Stillstand bringen. Je nach der Art der Bewegung, dem Charakter des Gesteins und den Dimensionen der bewegten Massen lassen sich Gleit-, Rutsch- und Sturzbewegungen von weichem und felsigen Material unterscheiden. **) Bei ersteren spricht man von Erdschlipfen, bei letzteren je nach der Bewegung von Bergschlipfen und Bergstürzen, bei kleineren Massen von Felsstürzen und Felsschlipfen.

Im allgemeinen können wir nach Machatschek***) die Massenbewegungen in 2 Teile gruppieren: 1) in Bewegungen von lockeren Massen; 2) in solche anstehender Gesteine.

Zu 1): Die von der Verwitterung losgelösten Teile folgen dem Einfluß der Schwerkraft, häufen sich an geneigten Flächen unter einem Winkel an. Es entstehen die Schutthalden. Bei starker Durchtränkung verwandeln sie sich in flache, gletscherähnliche Schuttströme. Eine für die polaren Gegenden charakteristische Form der Schuttbewegung ist der Bodenfluß oder Solifluktion. Bei starker Durchtränkung und mangelnder Vegetationsbedeckung bilden sich übereinander angeordnete Wülste auf geneigten Flächen, entstanden durch eine ruckweise Bewegung des Schlammes, der die Rasendecke vorschob und überwälzte. †)

Von den Schutthalden ist der Gehängeschutz zu unterscheiden, das dem Gehängeschutt unmittelbar auflagernde Verwitterungsmaterial.

Nach Götzinger††) kann diese ebenfalls durch Durchtränkung unter der Vegetationsdecke eine sehr langsame, kriechende Bewegung ausführen. Sie hat dadurch eine große morphologische Bedeutung,

*) Passarge: Grundlage der Landschaftskunde. 1920. Band III, S. 177.
**) Braun: Ueber Bodenbewegungen. 11. I. Ber. Geog. Ges. Greifswald 1908.
***) Machatschek: Geormorph. 1919. S. 27.
†) " " " S. 28.
††) Götzinger: Beiträge zur Entstehung d. Bergrückenformen. Geogr. Abhdl. 9. 1907. 1.

daß durch sie allmählich scharfe Kämme in breite Rücken umgewandelt und diese von neuem der Verwitterung preisgegeben werden.

Sobald die Durchtränkung sehr groß geworden ist, reißt sich nach Machatschek*) an steileren Böschungen ein Teil des Schuttmantels von den Felsunterlagen ab, und es entsteht eine Rutschung. Am bevorzugten sind Wiesen und Felder. Oft geraten aber auch größere Massen anstehender, tonreicher und undurchlässiger Gesteine in eine derartige halbrutschende, halb fließende Bewegung.

Auf die Bewegungen in der Bodendecke werden wir noch des öfteren zu sprechen kommen. —

## b) die flächenhafte Wirkung des Regens.

Das Regenwasser, das nach Berührung mit dem Boden nicht mehr in diesen eindringen kann, wird zum oberflächlichen Abfluß gezwungen. Nach Kaufmann**) „Rhytmische Phänomene der Erdoberfläche" vollzieht sich der Vorgang des Wasserabflusses auf geneigten Flächen in der Natur auf zwei einander entsprechenden Wegen: 1) durch oberflächliches Abfließen. Die entstehende Reliefbildung ist in diesem Falle bedingt durch das Uebereinandergleiten zweier Medien; 2) auf dem Wege unterirdischer Sickerströmung, der Ausbildung von Untergrund-Entwässerungsbereichen. Im Schutt der Berghänge bewegen sich die Wassermassen langsam als „Gehängestrom", in den Niederungen als „Auestrom". In solchen Fällen haben wir es mit der Diffusion des Wassers in den Oberflächenschichten zu tun. Besonders auf undurchlässigen Schichten bilden sich derartige Entwässerungssysteme aus. **)

Ein oberflächliches Abfließen des Regenwassers wird eintreten, wenn der Boden nicht mehr imstande ist, noch mehr Wasser in sich aufzunehmen. Das ist der Fall nach einem plötzlich fallenden starken Regen oder nach einem andauernden Landregen. Der Boden ist dann so durchtränkt, daß er sich im Zustand der Sättigung befindet. Das überschüssige Wasser muß also bei der geringsten Neigung der Fläche abfließen.

Aber auch „eine dünne, zur Aufspeicherung großer Wassermassen ungeeignete Verwitterungskrume auf undurchlässigem Grundstein verhindert die ausgiebige Versickerung und zwingt das niedergeschlagene Wasser zum offenen Abfluß oder zur baldigen Rückkehr

*) Machatscheck: Geomorph. S. 29.
**) H. Kaufmann: Bonn 1928. Auszug S. 7.
***) Kaufmann: S. 7.

in Dampfform, wenn die Größe und mannigfache Bodengestalt der Gebietsfläche und die Gliederung des Gewässernetzes der ausgedehnten Gebirgsgebiete verhindern, daß eine Abflußstelle in kürzester Frist von den abfließenden Wassermassen überschritten wird." *)

Durch den oberflächlichen Abfluß wird eine weitere und die wichtigste mechanische Regenwirkung hervorgerufen: es ist die oberflächlich abspülende**) und dabei transportierende Kraft des Regenwassers. „Unter der Einwirkung des Wassers werden Gesteinsbruchstücke bewegt. Wirksam ist dabei: Minderung der Reibung zwischen den festen Teilen, Herabsetzen des spezifischen Gewichtes der im Wasser befindlichen festen Massen und die lebendige Kraft des fließenden Wassers." ***)

Die abspülende Kraft des Regens hängt zunächst von dem Neigungsgrad der Böschung und von der Regenmenge ab. Je größer die Neigung eines Hanges ist, um so schneller wird das Regenwasser über ihn hinwegfließen." Wenn auch die Regenmenge, die über eine stark geneigte Fläche abfließt, nur gering ist, so ist doch ihre Kraft nach der physikalischen Formel: $K = {}^1/_2\, m \,.\, v^2$ gemäß der Geschwindigkeit der bewegten Regenmenge sehr groß. Die Kraft des oberflächlich abfließenden Regenwassers nimmt überall auf der Erde mit Kleinerwerden des Gefälles ab und zwar, da vom Gefälle die Geschwindigkeit abhängt, im Quadrat der Geschwindigkeit. Es hängt also die mechanische Transportkraft des Regenwassers nicht allein von dessen Menge, sondern vornehmlich von dem Gefälle ab." †)

Auf den Feldern können wir bei kräftigen Regengüssen die Beobachtung machen, wie das feinkörnige Material nach vorhergehender Bearbeitung durch die aufschlagenden Regentropfen gelockert und von dem abfließenden Wasser fortgetragen wird. Wir finden, daß die Oberfläche meist rauh und steinig geworden ist; die größten Gesteinstrümmer bleiben liegen und häufen sich an. —

Je nach der Heftigkeit des Regens werden kleine und größere Partikel des lockeren Bodens in Bewegung gesetzt, bei Wolkenbrüchen auch Steine und Blöcke, und werden abwärts geführt. Schließlich werden sie am Fuß des Abhanges, wo das Gefälle abnimmt, angelagert als Schwemmhalde oder Schwemmkegel, oder sie werden einer Wasserrinne zum Weitertransport übergeben.

---

*) H. Keller: Die Abflußerscheinung in Mitteleuropa. Geogr. Zeitschr.: 1906. S. 685.

**) A. Penck: Morph. d. Erdoberfläche. 1. Band. 1894. S. 231.

***) Ramann: Bodenkunde. 1905. S. 51.

†) E. Bach: Ueber d. morphl. Bedeutung d. Regens. 1915. S. 9.

Man kann, wie schon erwähnt wurde, im Herbst auf einem vegetationslosen Felde alle diese Abspülungsvorgänge im kleinen beobachten. Die Ackerkrume ist vollständig den unmittelbaren Regenwirkungen ausgesetzt, sie erleichtert z. T. dem auffallenden Regen seine Arbeit, da sie durch Menschenhand evtl. aufgelockert worden ist. Die vorher durch den Pflug steil gestellten und scharfkantigen Schollen erhalten eine runde Form; was von ihnen abgespült wird, sammelt sich in den Furchen an. Auf diese Weise vermindert sich die Höhendifferenz zwischen Scholle und Furche. Mit der Zeit wird eine allmähliche Einebnung des Ackerfeldes stattfinden.

Wir wollen den oberflächlichen Abfluß des Regenwassers in 3 Formen betrachten: 1) das Wasser rinnt flächenhaft über einen Hang hinab; 2) es sammelt sich in Unebenheiten der Hänge an; 3) es sammelt sich schließlich in Gestalt dauernd fließender Flüsse, Bäche und Wildbäche an; aber „es ist kaum möglich, eine scharfe Grenze zwischen dem spülenden und dem in Rinnen fließenden Wasser zu ziehen; man könnte theoretisch die Grenze dort ansetzen, wo die bei jedem Regen wechselnden kleinen Gerinne in Rinnsale übergehen, die dauernd im Gelände kenntlich bleiben, wenn sie auch keineswegs dauernd Wasser zu führen brauchen. Ist die Grenze unscharf, so ist der Unterschied der Tätigkeit zwischen dem flächenhaft spülenden und den in Rinnen gesammelten linear wirkenden Gewässern sehr groß.“ *)

## Das flächenhaft wirkende Regenwasser.

Unter der flächenhaften Abspülung wollen wir alle jene Abtragungsvorgänge verstehen, die außerhalb deutlich abgegrenzter und dauernder Wasserrinnen erfolgen. So werden wir auch die streifenförmig abgegrenzten und auftretenden Wasserfäden (Regenrillen), da sie ja in Massen dicht gedrängt vorkommen und so zusammen flächenhaft wirken, zur Flächenabspülung rechnen im Gegensatz zu den tief eingeschnittenen, dauernd fließenden Bächen und Flüssen.

Die morphologische Wirksamkeit der Abspülung besteht zunächst darin, daß das Verwitterungsmaterial entfernt wird; lockere Bodenpartikel werden beseitigt. Auf diese Weise wird das darunter liegende Gestein langsam angegriffen. Gewisse Teilchen werden losgelöst, abgespült und zusammen mit dem Verwitterungsmaterial als Schwemmkegel irgendwo abgelagert. Auf dem Transport erleidet das Material verschiedene Deformationen. Durch die gegenseitige

*) Philippson: Allgem. Geogr. 3. Bd. 1924. S. 32.

Reibung und das Aneinanderstoßen sowie durch das Rollen auf dem Erdboden wird es gerundet und das um so mehr, je länger der Weg des Transportes ist. — Ein kleinerer Regenfall wird nur kleinere Brocken mit sich führen können. Dies zeigt sich deutlich in der Zusammensetzung der Schwemmkegel. Die Aufeinanderfolge von starken und leichten Regenfällen ruft hier einen schichtweisen Wechsel von gröberem und feinerem Material hervor. —

Notwendig ist vor allen Dingen, daß die Wasserdecke eine gewisse Zeit anhält. Das gröbste Material wird dann am Boden gerollt, Sand und Schlamm werden fortgeschleppt. Sobald nun die Wassermenge abnimmt, oder irgendeine Abflachung des Hanges und dadurch eine Verlangsamung der Wassergeschwindigkeit eintritt, beginnt die Ablagerung. Die groben Gesteine bleiben, da sie am schwersten sind, zuerst liegen, dann folgen in absteigender Linie Sande, schließlich im stehenden oder verdunstenden Wasser der feinste Schlamm. Natürlich wird es dabei auch Abweichungen geben, denn alle Korngrößen werden bei einer Abspülung nicht immer gleichmäßig bewegt werden; es wird vielmehr ein Durcheinanderschieben der verschiedenen Stoffe stattfinden. Auch ein starker Wechsel des Gefälles bedingt eine ungleiche Ablagerungsform sowohl in der Verbreitung als auch in der Form.

Schichtfluten, die in gewaltiger Höhe über eine Fläche hinabfließen, wie sie für das Klima der Savannenlandschaft typisch sind, spielen in unserem Klima nur eine geringe Rolle, aber immerhin werden auch bei uns bei kräftigen Regen und Wolkenbrüchen vegetationslose Hänge überspült. Besonders stark werden die umgeackerten Felder angegriffen, Löcher werden gerissen und kleinere Pflanzen und Sträucher entwurzelt. Auf diese Weise wird dem Wasser bessere Gelegenheit zur Abtragung gegeben, da der Boden locker geworden ist.

Die meisten Regen, die in unseren Breiten fallen, sind langanhaltende Landregen, aber auch Gewitterregen und Wolkenbrüche sind nicht selten. Die Regenart kann je nach den klimatologischen Bedingungen, die einen Regen hervorrufen und begleiten, sehr verschieden sein. Schwalbe*) unterscheidet mehrere Regentypen: einen Schauertypus, Landregentypus, Uebergangstypus und einen Gewitterregen. Alle diese Arten kommen in unserer Zone vor. Jede Art hat eine verschiedene Regenmenge, eine verschiedene Zeitdauer, verschiedene Temperaturen und Zusammensetzungen. Bei einem Gewitterregen erfolgt in kurzer Zeit ein starker, mit Säuren

*) Schwalbe: Meteor. Zt. 1907. S. 385—393.

beladener Niederschlag. Den Gegensatz dazu bildet der Landregen mit einem langen, über große Flächen gleichzeitig fallenden Niederschlage, der mäßig stark ist und infolgedessen ziemlich tief in den Boden eindringt.

Wichtig ist die Böschung. „Eine völlige Ebene ist nicht günstig, aber auch nicht eine zu steile Böschung. Es muß das Wasser langsamer abfließen, als durch den Platzregen Zufuhr erfolgt. Nur dann kann sich eine zusammenhängende und der Möglichkeit nach wirksame Wasserdicke entwickeln. Demgemäß sind flachgeböschte Gehänge am günstigsten, auf denen der Reibungswiderstand bereits kräftig wirkt und zur Ansammlung von Wasser führt." *)

Mit den Bedingungen der Abspülung werden wir uns in einem späteren Kapitel beschäftigen.

Ein Abfließen des Wassers wird auf den verschiedenen Bodenarten verschieden zeitig eintreten. Auf undurchlässigem Boden und an steilen Hängen kommt es eher dazu als bei durchlässigem Boden und flachen Gehängen. Das Wasser läuft, wie man überall beobachten kann, zwischen den einzelnen Steinen, Erhebungen des Bodens, Wurzeln usw. in gewundenem Laufe die Hänge hinab. Es folgt dem Gefälle, vereinigt sich in größeren Senken zu Regenbächen, die sich dann in dauernde Gewässer ergießen. Auf diese Weise wird ein Teil des Regenwassers unmittelbar den Flüssen zugeführt. Der Boden wird angegriffen, feinere Erde und Steine werden mitgenommen, nach abwärts geschoben, sie reißen wieder andere kleinere Hindernisse mit sich. — Eine dichte Pflanzendecke verhindert, wie wir später noch sehen werden, die Wirkung der Abtragung oder vermindert sie stark. Ein Teil des mitgeführten Materials bleibt wieder an Aesten, Stengeln und Steinen hängen und wird festgehalten, die Feinerde dagegen wird mitgenommen. Allmählich bilden sich in großer Zahl und in unregelmäßiger Anordnung kleine Rinnen aus. Sie sind nur wenige mm tief.

## Die Bildung der Rinnen.

Sicher sind es zunächst die mitgeführten Partikel und Steine, die bei der Abflußbewegung kleine Rinnen in den Boden kratzen, somit das Bodengefüge an diesen Stellen besonders stark lockern und vertiefen, sodaß dem nachfolgenden Wasser Gelegenheit gegeben wird, sie weiter auszunagen und sich in ihnen zu sammeln. Nach meinen Beobachtungen geben auch größere und festere Hindernisse, die nicht vom Wasser mitgeführt werden können, oft den

*) Passarge: Grundl. d. Landschaftskunde. 1920. Bd. 3, S. 241.

primären Anlaß einer Rinnenbildung. Das Wasser fließt z. B. flächenhaft über eine Fläche hinab, es stößt in seiner Bewegung auf einen Stein. Sofort wird vor diesem eine kurze Stauung der Wassermengen stattfinden. Im selben Augenblick aber fließt das Wasser um den Stein herum nach beiden Seiten mit erhöhter Geschwindigkeit, da die Wassermasse sich vermehrt hat, ab. Die Folge wird eine erhöhte mechanische Tätigkeit des Regenwassers sein, die die Rillen liefert.

Th. A. Jaggar*) stellte, um das erste Verhalten von wasserführenden Schichten kennen zu lernen, folgende Versuche an: Eine geeignete Fläche wurde mit Pochschlamm völlig gleichmäßig überdeckt. Nach 2 Std. Bestäubung bildete sich ein Muster von Regenrillen heraus, über welches Kaufmann**) schreibt: „Also trotz der völligen Einfachheit und Homogenität der Anfangsbedingungen, trotz der völlig gleichmäßigen Benetzung aller einzelnen Punkte der Oberfläche ging der Wasserablauf nicht gleichmäßig vonstatten, sondern als Folge des Gleitens bildete sich ausgehend von der Berührungsstelle der beiden Medien durch rhytmische Selbstdifferenzierung spontan ein System von „Flußsystemen" heraus."

Ich konnte bei meinen Regenmessungen keine Spur einer Herausbildung von Flußsystemen oder überhaupt von Rillenbildungen an den Flächen meiner Pyramiden, (vergleiche Abschnitt 3) deren Bodenmaterial vollkommen gleichmäßig beschaffen und aufgebaut war, beobachten, trotz der immerhin ziemlich starken Regenfälle; bei einem Regenfall von 16,5 mm zeigte sich ebenfalls keine Spur einer Rinnenbildung. Das Regenwasser lief vielmehr gleichmäßig über die Flächen hinab.

Auch durch künstliche, gleichmäßige Beregnung gelang mir die Erzeugung von Regenrillen nicht. Sie bildeten sich nach meinen Beobachtungen erst dann heraus, als die Fläche unregelmäßig, d. h. verschieden stark benetzt wurde. Besonders stark beregnete Flächenstücke neigten zur Rillenbildung. — So kommt nach meinen Beobachtungen die Ausbildung von „Flußsystemen" nur zustande, 1. durch unregelmäßigen Einfall der Regentropfen oder Regenmenge auf ein bestimmtes Flächenstück; 2. durch Unregelmäßigkeit und Unebenheit in der Beschaffenheit des festen Mediums; 3. durch die mechanische Tätigkeit der bei der Abspülung mitgeführten Partikel.

---

*) Jaggar, Th. A.: Experiments illustrating Erosion and Sedimentation. (Bull. Mus. of Comp. Zool. Bd. 49 Geol. Serv. Bd. 8 Nr. 6. 1908 S. 294.

**) Kaufmann: Rhytm. Phänomene d. E. S. 7.

Die kleinen Rinnen, die so entstehen, werden durch Zweige, Blätter usw. sehr leicht verstopft werden, sodaß das Wasser aus seiner ursprünglichen Richtung abzweigen und sich einen neuen Weg suchen wird. Ihre Unbeständigkeit steigert sich aber noch dadurch, daß die Rinnenwände nach dem Regen, wenn sie austrocknen, besonders bei starker Bestrahlung und Wind, abbröckeln, da die einzelnen Bodenteilchen durch den Feuchtigkeitsverlust ihren festen Zusammenhang verlieren.

Wir beobachten die Regenrillen häufig an steileren Hängen, wo der Boden vegetationslos bezw. kaum bewachsen ist. Meist entstehen sie an den Stellen, an denen der Mensch die Vegetationsdecke künstlich entfernt hat.

Sehr gute Beobachtungen über die Abtragung durch den Regen kann man bei einem Mergelboden machen. Gelegenheit dazu bietet der diluviale Geschiebemergel der Steilküste der Stolteraa bei Warnemünde an der Ostsee. Die mechanische Kraft der Abspülung

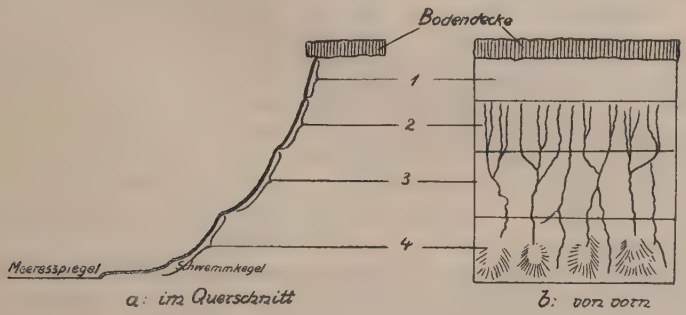


Fig. 4.
Die Steilküste der „Stolteraa" (schematisch).
Die Zahlen in den Figuren stellen die einzelnen „Zonen" dar.
Vergleiche den folgenden Text.

ist hier eine besonders starke. Die Küste hat nördliche Exposition, wird also von Nord- bezw. N.-W.- und Westwinden, die Regen bringen, ständig betroffen. Lockere Teilchen, die an der Oberfläche liegen, werden abgespült und mitgeführt. Um so mehr ist das der Fall nach längerer Trockenzeit, wenn die einzelnen Bodenteilchen an der Oberfläche in einem lockeren Gefüge zueinander stehen. Es kommt hier, je nach der Regenart und Dauer bei gewisser Gleichmäßigkeit des Bodenmaterials zu einer flächenhaften Abspülung und zur Ausbildung einer Unmenge von Regenrillen, in denen die

feinen Bestandteile bis an den Fuß der Steilküste, einige Zentimeter über den Meeresspiegel abgelagert werden. Die Ablagerung findet statt in Form von deutlich ausgeprägten Schwemmkegeln. Hin und wieder brechen größere Bodenmassen infolge allzugroßer Belastung durch die Wasseraufnahme los, rutschen am Hang hinab, bleiben unten liegen. Die obere Bodendecke der Steilküste, bestehend aus einer Rasendecke, Strauchwerk und einem Wäldchen von Pinus montana, gewähren der Abtragung bezw. dem Abrutschen eine kleine Verzögerung. Hand in Hand mit der Abspülung geht die Arbeit des Meeres, die bei höherem Wasserstand die Schwemmkegel mit sich fortträgt.

Die Abtragung an der Steilküste konnte ich nach meinen Beobachtungen in verschiedene „Zonen" nach Abtragungsart und Stärke im Durchschnitt einteilen.

Die oberste Zone (vergl. Fig. 4 a und b): Die Bodendecke verhindert jede Abspülung; sie übt eine gewisse Schutzwirkung auf die darunter liegenden Schichten aus. Die Zone I stellt die steilste dar. Regenrillen kommen auf ihr nicht zur Ausbildung, das Wasser rinnt flächenhaft ab. In der Zone II kommt es zur Ausbildung bei schwächer werdender Neigung von einer Unzahl annähernd parallel verlaufenden Regenrillen, die nicht tief eingenagt sind. Zone III: Es kommt zu einer Vereinigung dieser parallelen Regenrillen zu großen, tief eingeschnittenen Rinnen, deren Verlauf keine Parallelität mehr aufweist. Die Zone IV ist die der Schwemmkegel, die häufig von nachgestürzten Bodenmassen bedeckt werden. Sie werden von großen Regenrinnen zerschnitten.

Das Abrutschen und Abbrechen von Bodenmassen war hauptsächlich in dem unteren Teil der Zone II zu beobachten. Sie wiesen vielfach eine Mächtigkeit von 30 bis 60 cm auf. — Im allgemeinen können wir mit Kaufmann*) feststellen, daß bei steilerer Neigung des Hanges sich ein System paralleler Rinnen ausbildet, die kaum miteinander verschmelzen. „Auf weniger geneigten Flächen kommt es sehr bald zu einer Vereinigung benachbarter und zur Herausbildung einzelner besonders tiefer Furchen."

Wie schon erwähnt wurde, haben diese Regenrisse im allgemeinen eine zu geringe Lebensdauer, als daß sie sich zu eigentlichen Schluchten entwickeln könnten. Sie bröckeln auseinander infolge der Austrocknung durch Wind und Sonnenstrahlung, werden durch die stetig stattfindenden Bodenbewegungen zusammengedrückt, eingeebnet oder durch die Vegetation bewachsen. So glätten sich allmählich die Rillen und Löcher wieder von selbst aus.

*) Kaufmann: Rhytm. Phänomene d. Erdoberfläche, Seite 10, i. Auszug.

Jede Unregelmäßigkeit des Bodens auf den geneigten Flächen lenkt das abfließende Regenwasser in eine andere Richtung, jede Vertiefung, so flach sie auch sei, zieht das Wasser an sich. Es sammelt sich in den flachen Geländemulden mit feinerdigen Partikeln beladen und fließt von ihnen langsam zu Tal. Die Hänge aber werden, wie wir an Hand von Messungen noch sehen werden, abgespült, d. h. langsam fortschreitend, flächenhaft erniedrigt. Berge und Rücken werden langsam abgerundet, abgeflacht und erhalten allmählich eine konvexe oder konkave Form.

## Die mechanische Regenwirkung in Mulden und Dellen.

Wiederholen wir kurz noch einmal die Ergebnisse der flächenhaften Abspülung. Ist der Boden eines Hanges durch lang anhaltenden Regen bereits stark durchfeuchtet und kaum mehr wasseraufnahmefähig, und fallen bei heftigem Guß die Tropfen sehr schnell und dicht, so vermögen sie weder einzusickern noch sich in kleineren Rinnsalen zusammenzuschließen; statt dessen fluten sie als einheitliche Wassermasse den Hang hinunter, alles irgendwie gelockerte Schuttmaterial mit sich reißend. In der Endwirkung kommt nach Supan*) Tropfenarbeit und Schichtflutarbeit auf das nämliche hinaus: flächenhafte Abtragung des Hanges. —

Wenn die Böschung so wenig geneigt ist, daß das Regenwasser nicht mehr an der Oberfläche fließen kann, so sammelt es sich in Tümpeln und sonstigen Unebenheiten an. Die flachen und steilen Hänge verlaufen nie gleichmäßig, stets sind sie durch kleine Senken und Mulden gegliedert.

Schmitthenner**) nennt sie „Dellen". Sie sind flache langgestreckte, oft auch verzweigte Hohlformen von gleichsinnigem Gefälle, deren Wände in sanfter Rundung ineinander übergehen, ohne gegen eine Sohle abgesetzt zu sein. Diese Rundung und das Fehlen eines dauernd fließenden Baches unterscheidet die Dellen von flachen Tälern. Am auffälligsten sind sie auf den Hochflächen: ein Geländerücken löst den anderen in ewiger Monotonie ab, eine Delle die andere. Auch an Berghängen sind Dellen vorhanden, die Schmitthenner „Hangdellen" nennt. Aehnliche Formen, die aber anders gestaltet sind, bezeichnet Stratil-Sauer***) als

*) Supan: Grundzüge der phys. Erdkunde. Berlin u. Leipzig. 1930. 7. Auflage, Band 2, Teil 1, S. 175.

**) Schmitthenner: Die Entstehung der Dellen u. ihre morph. Bedeutung. Zt. f. Geomorph. 1925. Seite 4—6.

***) Stratil-Sauer: Der Erdschlipf im Lewiner Ländchen. Diss. Ausz. Breslau 1922.

„Tilke". Er versteht darunter ein steilwandiges Wiesentälchen mit temporärer Wasserführung, das wechselnd konkav und konvex geböschte Hänge mit häufigen Erdschlipfen und mehr oder minder ebenem Talboden aufweist. Die Verbreitung der Tilken beschränkt sich nach Stratil-Sauer*) auf Grasland, während die Dellen auch im Acker und Waldland auftreten können.

In diesen Dellen und Mulden sammelt sich das Regenwasser der Flächenspülung, Regenrinnen, evtl. der Gelegenheitsbäche. Sie bringen einen großen Teil des abgespülten Materials mit, schleppen es in die Haupttäler hinein, den größten Teil lassen sie aber in den Einsenkungen zurück, wie wir uns nach jedem kräftigen Regenfall an den Schuttkegeln, an ihrem Boden- und Wandbelag überzeugen können. Die Zusammensetzung derselben ist je nach der Art des Bodens, in welchem sie liegen, eine verschiedene. Häufig wechselt nach stärkerem Regen die Dicke und der Ort der Anschwemmungen bezw. des Wand- und Bodenbelages. Das in ihnen abfließende Regenwasser wird wie bei der Flächenspülung selbstverständlich neben der Tätigkeit des Geröllransportes auch den Boden angreifen. Stärkere Regenfälle haben natürlich eine entschieden größere Wirkung als kleinere, denn durch die größere Wassermenge wird eine vermehrte Abflußgeschwindigkeit und somit eine vermehrte Angriffskraft geschaffen. Sind die Dellen usw. länger, so wird sich in ihnen ein längerer Gelegenheitsbach entwickeln, der den Boden und die Wände mehr anzugreifen vermag. Wie bei der vorübergehenden Rinnenbildung wird, wie wir gesehen haben, die Sohle erniedrigt, die Wände der Delle werden durch die mitgeführten Gesteinspartikel, die die Erdmasse aufreißen, angegriffen. Die locker gewordenen Bodenteile werden mitgeschleppt und als Schuttkegel am Ende der Delle abgelagert, oder sie werden in die Haupttäler hineingetragen.

Nach dem Regenguß, wenn das Regenwasser eingesickert, bezw. in die Haupttäler abgeflossen ist, trocknen die Wände gewöhnlich schnell aus. Die Vegetation in diesen Geländemulden, die durch die Wasserabflußbewegung mit Schutt und Schlamm bedeckt worden ist, richtet sich langsam wieder auf. Die zum Teil weggerissenen und aufgelockerten Stellen werden von den Pflanzen wieder besiedelt. Kleinere Regenfälle, die entsprechend ihrer Größe geringere und feinere Bodenbestandteile mit sich führen, füllen mit ihrem Material, das an den Hängen und Wänden der Mulden flächenhaft, sanft hinabgespült wird, die aufgerissenen Löcher wieder auf. Schließlich trägt auch noch der Wind mit seiner Kraft dazu bei, indem er das ausgetrocknete feine Material gleichmäßig verteilt und

*) Stratil-Sauer: Die Tilke. Z. f. Geomorph. 1930. Bd. 4, Heft 1, S. 258.

ausgleichend wirkt. Mit Schmitthenner*) dürfen wir wohl feststellen, daß Abspülung und Bodenbewegung, die auch hier stattfinden werden, kräftiger arbeiten als die Erosion der Gelegenheitsbäche. Letztere bilden sich nur in größeren Zeitabständen bei kräftigen Regengüssen oder Wolkenbrüchen. Abspülung und Bodenbewegung dagegen arbeiten stetiger infolge des viel öfteren Auftretens kleiner Regengüsse und werden von ihrem morphologischen Wirken durch die Kräfte der Gelegenheitsbäche verstärkt werden.

Beide Vorgänge der Abtragung arbeiten hier, wie wir am Schlusse feststellen wollen, gemeinsam an der Glättung der Hänge, die infolgedessen in sanftere und runde Formen ineinander übergehen. Wir haben es hier mit einer Abtragungserscheinung des Regens zu tun, die ihr Ziel in der Flächenspülung, in einer welligen Einebnung des Landes hat.**)

## Das Regenwasser in Tümpeln und Pfützen.

„Wenn die Böschung so flach ist, daß das Regenwasser nicht an der Oberfläche abfließen kann, sondern in Tümpeln steht und in den Boden versinkt, um aus ihm als Grundwasser in die Rinnsale einzutreten, findet keine mechanische Abspülung statt.“ ***)

Durch das Fehlen ausgebildeter Regenrillen wird das Regenwasser vielfach aufgestaut werden. Es bilden sich dann, wie wir überall beobachten können, Tümpel und Pfützen. Oft vertrocknen sie schnell, oder ziehen rasch in den Untergrund ein, was auf durchlässigem Boden der Fall sein wird. Gefördert wird dieser Vorgang des schnellen Wasserverbrauches noch durch die Trockenheit des Bodens selbst; ist er wasserarm, so wird von ihm ein großer Teil des Wassers sofort festgehalten. Ist dagegen der Boden durch kräftige Regen durchfeuchtet und durchtränkt, und haben sich Regenrinnen ausgebildet, so wird das Regenwasser Gelegenheit haben, langsam abzufließen. Ist ihm das aus Gefällsmangel nicht möglich, so wird es sich wieder in Pfützen und Tümpeln ansammeln, die diesmal eine längere Lebensdauer haben werden. Der wasserdurchtränkte Boden ist undurchlässig geworden, die Verdunstung wird infolge der allgemeinen Feuchtigkeit eine geringe sein. — Zwischen Wasserschicht und Boden hat sich eine feine Schlammschicht gebildet, die das Einsickern des Wassers in den Boden verhindert. Bei er-

*) Schmitthenner: Die Oberflächenformen der Stufenlandschaft zwischen Maas und Mosel. Geogr. Abhdl. 1923. 2. Reihe, Heft 1, S. 38.

**) ebenda Seite 39.

***) A. Philippson: Allgemeine Geographie. 1924. Bd. II, 2. Hälfte, S. 33.

neuter Zufuhr von Regenwasser werden die vorhandenen Tümpel bald überfüllt, ihre Wände überflutet werden, so daß das Wasser sich neue Wege des Abflusses suchen kann. Die Abspülung ist in diesem Falle infolge der geringen Geschwindigkeit des Wassers wenig bedeutsam. —

### c) Die rinnenhafte Wirkung.

Die dauernd fließenden Gewässer, Bäche und Flüsse verrichten ihr Abtragungswerk ganz anders als die Gelegenheitsflüsse und -Bäche. — Unter der „abtragenden Kraft des Regens" dürfte zwar nur die Arbeit des Regenwassers im Augenblick des Auftreffens auf den Boden und bei der Ansammlung und dem Abfließen des Regenwassers flächenhaft oder in einer primären Rinne zu verstehen sein, wozu die Bäche und Flüsse auf keinen Fall mehr zu rechnen wären. Des Vergleiches halber soll ihre Tätigkeit hier kurz erwähnt werden. Die Wildbäche hätten eher noch den Anspruch, zum Thema gerechnet zu werden.

Im Gegensatz zu den Gelegenheitsbächen fließen die Bäche und Flüsse lange Zeit oder dauernd, Wildbäche meist eine kurze, periodische Zeit. Sie greifen daher den Untergrund stark und gleichmäßig an. Die Erosion überwiegt im Allgemeinen die Denudation, während es in den Dellen und Mulden umgekehrt der Fall war. Es besteht also ein wesentlicher Unterschied zwischen linearer Zerschneidung und flächenhafter Abspülung. *) Flächenhaft abfließendes Wasser hat, am Fuß eines Hanges angelangt, durch Verdunstung oder Verminderung an Menge höchstens verloren, an Schnelligkeit aber wegen der Reibung kaum zugenommen.**)

Wenn sich das abfließende Wasser dagegen in Rinnen sammelt, denen immer neue Rinnen zuströmen, so nimmt die Wassermenge gegen den Fuß des Abhanges hin bedeutend zu, infolgedessen wächst auch seine Fähigkeit zu zerschneiden und zu verfrachten. — Wildbäche sind nach Lautensach***) kleine Gerinne, die sich an steilen Hängen eines Gebirges bilden, oft nur bei starken Regengüssen fließen, dann aber in kurzer Zeit gewaltige erosive, akkumulative Leistungen vollbringen. Sie sind in ihrer Wirkungsart den Flüssen vollkommen identisch, nur verrichten sie ihre Arbeit in viel gewaltigeren Formen.

---

*) Passarge: Grundlagen der Landschaftskunde. Bd. 3. 1920. S. 248.
**) ebenda, S. 248.
***) Lautensach: Allgem. Geogr. 1926. S. 204.

Wie wirkt die lineare Abtragung? Das Wasser gehorcht zunächst wie bei der flächenhaften Abspülung dem Einfluß der Schwere und eilt von höherem nach niedrigerem Niveau. Bei diesen Bewegungen treten ganz außerordentliche Kräfte, Energiemengen, in Erscheinung. Eine Wassermenge M in ihrer Höhe h (über dem Meeresspiegel) besitzt nach Gravelius*) die potentielle Energie: M . g . h, wobei g die Beschleunigung durch die Erdschwere bedeutet. Als Masseeinheit wollen wir das kg und als Längeneinheit m (Meter) annehmen, so kommt also der in Q Kubikmeter Wasser enthaltenden Masse die potentielle Energie 1000 Q g h zu, was sogar schon bei kleineren Werten von Q und h ein sehr bedeutendes Arbeitsvermögen darstellt. Von dieser Arbeit wird ein Teil dazu verwendet, das Fließen durch Ueberwindung der inneren und äußeren Reibungswiderstände zu ermöglichen. Der andere Teil der Energie wird zur Ausgestaltung des Flußbettes und zum Transport des festen Materials im Flußbett verbraucht. Es ist nach Gravelius**) die Wucht (kinetische Energie) des Wassers allein, die gestaltbildend wirkt. Indem das Wasser sich mit Geschieben belädt, erhält es nun erst die große Kraft, mit dem es die Erdoberfläche furcht. Diese von der Wucht des Wassers geschobenen Geschiebe greifen den Boden wühlend und reißend an, sodaß aus der primären Furche, der Regenrille, allmählich eine Hohlform entsteht, die als Flußtal zu bezeichnen ist, bei der sich schon deutlich seitliche Wände zeigen. Aber damit sind den Geschieben, die zunächst nur in der Tiefe arbeiteten, sofort Angriffsstellen gegeben, an denen sie auch seitlich zu arbeiten vermögen. Durch sie werden die elementaren Hänge angegriffen, stellenweise untergraben, sodaß sie nachstürzen, wodurch eine Verbreiterung des Flußbettes und gleichzeitig eine Vermehrung des vom Wasser gestoßenen, arbeitenden Materials geschaffen wird. Dieser Vorgang wird sich immer kräftiger gestalten.

So wirkt das rinnende Wasser mit Hilfe der durch seine Energie in Bewegung gesetzten Geschiebe erodierend auf die Erdoberfläche. Das erste Ergebnis dieser Erosion ist das Flußtal.

Der Geschiebetransport beim Fließen des Wassers bedingt eine mechanische Abnutzung der Ecken und Kanten des mitgeführten Materials. Aus eckigen Schuttstücken werden glatte, meist flachrunde Gerölle. Wir können diesen Vorgang sehr gut am Flußufer beobachten. Ohne Unterbrechung werden gröbere und feinere Sandkörnchen gegen die am Boden liegenden Gerölle getrieben.

* Gravelius: Flußkunde 1914 S. 175 Bd. 2 Teil 1.
**) Gravelius: Flußkunde 1914 S. 28.

Die scharfkantigen Sandkörnchen sind hart, da sie meist aus Quarz bestehen, also eine größere Härte besitzen als die Gerölle. Es ist klar, daß dieses fortwährend wirksame Sandgeschiebe die Gerölle abschleift und glättet.

## 2. Die chemische Regenwirkung.

Das Material, das von dem abfließenden Regenwasser abgespült und weggeführt wird, verdankt seine Entstehung zum großen Teil der chemischen Wirkung des Regenwassers.

Die mechanische Verwitterung besteht in der oberflächlichen Lockerung des Gesteinsgefüges und der Auflösung des Gesteins in Bruchstücke ohne substantielle Veränderungen.*) Als Faktoren kommen hauptsächlich die Temperaturschwankungen in Betracht. Die chemische Verwitterung wirkt dagegen verändernd auf die Gesteinszusammensetzung durch die Niederschläge und das von ihnen stammende Sickerwasser, die auf das Gestein lösend wirken. Eingeleitet wird diese chemische Umwandlung z. T. durch die direkte Sonnenstrahlung und durch das Berühren mit der Luft. Hauptsächlich ist es aber das Regenwasser, das, wie wir gesehen haben, das Gestein und die Böden in den Spalten und Kapillaren durchtränkt und durchfeuchtet, und infolge seines Gehaltes an Sauerstoff, Kohlensäure, salpetrige Säure usw. auf die einzelnen Steine im verschiedenen Maße lösend wirkt. Infolge dieses Vorganges werden die leichter löslichen Gesteine mehr und schneller angegriffen als die schwer löslichen. Durch den Zerfall des chemisch umgewandelten Gesteins entsteht der Verwitterungsboden. Würde die Oberfläche der Erde überall dieselbe Widerstandsfähigkeit gegen die chemische Löslichkeit haben, so würde überall die chemische Lösungskraft des Regens gleich stark wirken. Da aber die Erdrinde sehr mannigfach zusammengesetzt ist, so sind die einzelnen Gesteine gegen die chemische Verwitterung des Regens nicht gleich stark widerstandsfähig. Die widerstandsfähigeren Gesteinsarten werden weniger angegriffen werden, sie erhalten also längere Zeit ihren ursprünglichen festen Zustand als die leichter umwandelbaren.

Durch die chemischen Agentien werden die mineralischen Substanzen gelöst und in neue Verbindungen überführt, die dann teilweise wieder im Wasser löslich sind. Am wichtigsten ist die Auflösung der Silikate; hier werden die Alkalien und alkalischen Erdmetalle frei und gehen in Lösung, während wasserhaltiges Alumini-

*) F. Machatscheck: Geomorph. 1919 S. 22.

umsilikat ausgeschieden wird. Wesentlich größer ist die Löslichkeit der Karbonate, namentlich unter Mitwirkung der Kohlensäure, noch größer die von Salz und Gips. „Geographisch wichtig ist, daß zu diesen Umsetzungen vor allem Feuchtigkeit und Wärme notwendig sind." *) Alle diese hydrochemischen Vorgänge gehen also bei höherer Temperatur besonders kräftig vor sich. Es sind daher die warmfeuchten Gebiete der Erde der hauptsächlichste Schauplatz der chemischen Verwitterung, bei denen das Maximum der Durchfeuchtung und Wärme zusammentreffen. — — Neben dem Regenwasser wirken noch zersetzend die Tiere durch die bei ihrer Verwesung ausscheidenden Stoffe, wie Kohlensäure, Ammoniak und Salpetersäure; auch wühlende Tiere beteiligen sich an der Lockerung und Durchmischung des Bodens. Namentlich aber wirken die Pflanzen, aus deren Zersetzung sich Kohlensäure und Humussäure-Verbindungen entwickeln, auf die Auflösung des Gesteins ein. Dazu kommt noch bei Pflanzen die lösende Wirkung der von den Wurzeln ausgeschiedenen organischen Säuren. Auch die Bodenbakterien und Bodenflechten sind von großem Einfluß auf die Bodenbildung.

Die Stärke und Art der chemischen Verwitterung ist also in erster Linie bedingt durch das Klima, also regional, in zweiter Linie lokal durch die Gesteinsart. **) So wird man klimatische Zonen der Verwitterung und der Bodenarten unterscheiden können.

Wir begnügen uns mit dieser kurzen Darstellung der chemischen Wirkung des Regens. Für unsere Zwecke ist es nur von Wichtigkeit, zu erfahren, welche Bedeutung die chemische Regenwirkung für die Abtragung und Abspülung durch den Regen hat.

Für die Formung der Erdoberfläche ist der Verwitterungsboden von großem Einfluß; er ist leicht beweglich, er erleichtert daher alle Abtragungsvorgänge. Die leicht löslichen Gesteine werden mehr angegriffen als die schwer löslichen. Infolgedessen werden die leichter löslichen Gesteine viel eher von einer Verwitterungsdecke überlagert sein als die schwer löslichen. Der Regen wird diese Verwitterungsdecke abzuspülen versuchen, auf diese Weise werden die untersten und ein wenig verwitterten Schichten an die Oberfläche gebracht; der Prozeß kann von neuem beginnen. „Die chemische Verwitterung leistet daher die wichtigste Vorarbeit für die Denudation und beschleunigt deren Verlauf." ***) Je nach der Lagerung der Gesteinsschichten wird durch die chemische Regenwirkung verbunden mit der mechanischen die eine oder andere Oberflächenform hervorgerufen.

*) Philippson: Allgem. Geogr. II. 2. Heft, S. 6.
**) Philippson: Allgem. Geogr. II. 2. Heft, S. 5. ***) Philippson: 2. II. S. 5.

## 3. Die Abtragungsmengen.
### (Versuche und Messungen.)

Wir haben bis jetzt die verschiedenen mechanischen Wirkungsweisen des auftreffenden und abfließenden Regenwassers kennen gelernt, ohne uns eine Vorstellung zu machen, in welchem Maße nun eigentlich die Abspülung, bezw. Abtragung vor sich geht. Die Mengen werden, wie wir sehen, je nach den Bedingungen, die recht mannigfaltig sind, äußerst verschieden sein. Wir stoßen bei unseren Messungen und Betrachtungen auf größere Schwierigkeiten, und es kostet unendlich viel Mühe und Ausdauer, die Messungen korrekt durchzuführen. Es gilt bei ihnen, eine Menge von Faktoren zu betrachten, jeder verursacht je nach seiner Stärke ein besonderes Bild; es ist sehr schwer, sie alle zu einem Gesetz über die Abtragungsverhältnisse zusammenzufassen, worauf wir hinzielen. Wir stützen uns in unseren Betrachtungen hauptsächlich auf eigene Messungen und Beobachtungen und versuchen aus den einzelnen Vorgängen, wie in der Einleitung schon erwähnt wurde, zu einem „Ganzen" zu gelangen.

Der Verfasser hat sich zu seinen Beobachtungen und Messungen zwei Pyramiden erbaut, die eine aus Quarzsand, die andere aus Lehm. Beide Formen wiesen denselben Inhalt und die gleiche Oberfläche auf. Sie waren vierseitig, spitz, Grund- und Seitenflächen beider Pyramiden waren entsprechend gleich. Sie hatten eine gemeinsame Höhe von ca. 80 cm, eine Kante der Grundfläche von 2,50 m und eine Seitenkante von 1,50 m. Im Ganzen genommen, die Pyramiden waren sich äußerlich vollkommen gleich. Sie ruhten auf einer festen Unterlage, die sich in vollkommen horizontaler Lage befand. Beide Pyramiden wurden so aufgestellt, daß jede Seite genau einer Himmelsrichtung entsprach. Erwähnt sei noch, daß beide Bauten den gleichen klimatischen Einwirkungen ausgesetzt waren, Belichtung, Wind und Regen, ohne irgend welche anderen Einflüsse. Windbeobachtungen, Regenmessungen usw. wurden stets an Ort und Stelle vorgenommen. Das abfließende Regenwasser und die mit ihm abgespülten Bodenbestandteile wurden in besonders konstruierten Rinnen aufgefangen, jede Seite getrennt. Die festen Bestandteile wurden durch mehrfache Filtration bezw. Dekantation dem Wasser entzogen, getrocknet und gewogen. Neben diesen Messungen wurden noch einige an bewachsenen Flächen gemacht, die einer Pyramidenseite an Größe und Flächeninhalt entsprachen. Die Pyramiden waren spitz, die Seiten hatten eine Neigung von 30°. Den Sandmassen wurde beim Bau ein ganz

geringer Prozentsatz Kalk beigefügt, um den Flächen bei einer Neigung von 30° den nötigen Halt zu geben. Sämtliche Bodenmassen wurden ferner vor dem Bau durchsiebt, sodaß annähernd gleich große Bodenteile zur Verwendung gekommen sind.

Wenn die Wirkungen des Regens auf allen Flächen die gleichen wären, müßten wir auf ihnen durch die Wägungen die gleichen Resultate erzielen. Das ist aber nicht der Fall. Die einzelnen Seiten, die den Himmelsrichtungen exponiert sind, verhalten sich bei der Abtragung recht verschieden. Aus der Lage zur Himmelsrichtung und der Hangneigung ergeben sich zusammen mit den physikalischen Eigenschaften des Bodens eine große Zahl verschiedener Wechselwirkungen. Schließlich zeigt es sich, wie gewaltig die Abtragungen durch das Regenwasser auf der Erdoberfläche sind.

## Inklination.

Betrachten wir zunächst die Neigung einer Fläche = Inklination: Sie ist bestimmend für die Menge des abfließenden Wassers und für die Größe seiner Geschwindigkeit. Je steiler ein Gefälle ist, um so schneller wird das Wasser auf ihm abrinnen können, um so größer ist die Kraft des Wassers, und um so größer sind infolgedessen die Abtragungen durch den Regen, da mit zunehmender Geschwindigkeit die Energie des fließenden Wassers wächst. „Je stärker die Böschung, desto stärker ist die lebendige Kraft des Wassers, desto stärker die Abtragung (unter sonst gleichen Verhältnissen)." *)

Einige kleine Versuche zeigen uns das.

| Datum | Regenmenge in mm | abgetragene Sandmasse in Gramm bei einer Hangneigung von | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 20° | 30° | |
| 18. 10. | 8,6 | 29,0 | 41,5 | Die Gramm sind auf ganze u. halbe abgerundet. |
| 19. 10. | 4,1 | 13,5 | 21,5 | |
| 22. 10. | 7,4 | 7,5 | 22,0 | |
| 23. 10. | 3,3 | 4,5 | 14,5 | |
| 25. 10. | 4,5 | 11,5 | 18,5 | |
| | | 66,0 | 118,0 | |

Wir sehen, daß fast die doppelten Mengen bei einer Neigung von

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd., 2. Heft. Seite 33.

30° abgetragen werden als bei der von 20°. Dieses Beispiel aus eigenen Versuchen mag uns genügen.

### Die Exposition.

Die meisten Regen fallen in unserer Region bei N.-, W.- oder NW.-Winden; zum größten Teil handelt es sich um langandauernde Regen. Die Benetzung ist auf der der Regenwindrichtung zuliegenden Fläche größer als auf der abgekehrten, was wir voraussetzen wollen. Meist fallen die Regentropfen nicht senkrecht, sondern spitz- bezw. stumpfwinklig zur horizontalen Erdoberfläche durch die Winde, die sie begleiten. Die Beregnung ist also abhängig von der Windrichtung.

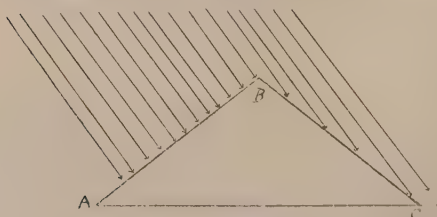


Fig. 5

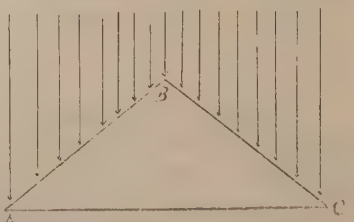


Fig. 6.

Die beiden Zeichnungen zeigen uns das sehr deutlich. Der Vorzug der Seite A—B in Fig. 5 gegenüber der Seite B—C in der Beregnung tritt klar zutage, denn die Regentropfen finden auf A—B, die wir als Fläche annehmen wollen, ein viel größeres Benetzungsareal vor als auf B—C, was durch den Einfall der Tropfen und die Lage der Fläche bedingt ist. Bei senkrechtem Fall der Tropfen wird A—B und B—C, wie Fig. 6 zeigt, gleich beregnet.

Wollny*) hat diese Regenmengen in seinen 1882 angestellten Versuchen genau gemessen und findet, wie die hier im Ausschnitt wiedergegebene Tabelle zeigt, daß die Nordseite in erster Linie, dann die Westseite, schließlich die Ost- und die Südseite in absteigender Reihe beregnet werden.

1. April bis 1. Oktober: 605280 ccm Regen;
davon verteilen sich pro 1 qm

| | bei 30° Neigung: | bei 15° Neigung: |
|---|---|---|
| auf die Nordseite: | 40983 ccm | 26802 ccm Wasser. |
| „ „ Westseite: | 36998 „ | 19699 „ „ |
| „ „ Ostseite: | 27802 „ | 18678 „ „ |
| „ „ Südseite: | 26966 „ | 13057 „ „ |

*) Wollny: Forschungen d. Agrik. Physik. 1895. Versuch I 1882.

Bei kleinen Erhebungen, wie wir sie hier betrachten, wird hauptsächlich die Lage zur Richtung des fallenden Regentropfens für die Benetzung ausschlaggebend sein und eine größere bezw. geringere Benetzung der Flächen herbeiführen. Anders wird es natürlich bei den Gebirgen sein: sie üben auf die Kondensation des Wasserdampfes, auf die Häufigkeit und Quantität der Regenfälle den größten Einfluß aus. Sehr viele Gebirge haben eine nasse Regenseite und eine Trockenseite, wenn sie einer vorherrschenden Luftströmung mit großem Wassergehalt in den Weg treten. Die nasse Seite eines Gebirges ist diejenige, die dem Hauptregenwind der betreffenden Gegend zugewendet ist; ihr gegenüber muß eine trockene Seite liegen, denn die feuchte Luftströmung verliert auf der ihr entgegen liegenden Gebirgserhebung den Wasserdampf, der über dem Sättigungspunkt der Luft bei der niedrigsten Temperatur der Kammhöhe, welche sie zu überschreiten hat, liegt. —

Neuerdings spricht man von einem „Mikroklima" *) im Gegensatz zum Makroklima. „Für die Frage der Exposition sind vor allen Dingen die Erscheinungen des Mikroklimas, worunter man das bodennahe Klima versteht, von Bedeutung, eine Stufe der vertikalen Klimagliederung, deren Wirkung für die Probleme der Bodenlehre von sehr großer Wichtigkeit ist." **) Ein Sonderzweig der Mikroklimatologie ist die „orographische Mikroklimatologie." Geiger***) versteht hierunter eine Modifizierung des Mikroklimas durch den orographischen Rahmen. Dies umfaßt aber in erster Linie auch die Auswirkungen, die ein Boden durch seine Exposition erfährt. Schwierigkeiten liegen in der Aufklärung der Wechselbeziehungen, die durch die spezifischen Bodeneigenschaften: Feuchtigkeit, Struktur, Farbe, Vegetation hervorgerufen werden.

## Das Verhalten des Sandes und Lehmes zu Wasser.

Wir hatten zu den Regenmessungen zwei Pyramiden aus Sand und Lehm erbaut. Es handelte sich um Quarzsand, dem eine geringe Menge Kalk beigegeben wurde, damit das Gefüge bei der großen Neigung einen festeren Halt erhielt, sonst würden die Sandmassen den Windwirkungen usw. dauernd ausgesetzt sein, und eine gewaltige Veränderung ihrer Oberfläche erleiden. Von einer Mischung des Sandes mit Humus ist abgesehen worden, um eine Krümelbildung des Sandes zu vermeiden, die durch die Beigabe

*) Blanck: Handbuch der Bodenkunde. 5. Seite 13. 1930.
**) Ebenda, Seite 13.
***) Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 1927.

von Humus bedingt gewesen wäre, und die somit eine Aenderung der Feuchtigkeitsverhältnisse hervorgerufen hätte.

Wie wir schon gesehen haben, ist für das Verhalten einer Bodenart zu Wasser die Korngröße der Einzelbestandteile von Wichtigkeit. Sandböden, besonders Quarzsand, bestehen überwiegend aus Körnern. Infolgedessen zeichnen sie sich durch eine lockere Lagerung der Einzelbestandteile aus. Ihre mineralogischen Bestandteile sind zur Krümelbildung wenig geeignet, nur der Gehalt an lehmigen oder humosen Stoffen fördern letztere. Infolge der lockeren Lagerung der Körner ist der Wassergehalt der Sandböden ein relativ geringer, da ja das Sickerwasser in den Boden abfließen kann; Kapazität und Permeabilität sind, wie wir gesehen haben, dagegen groß. Die großen Kapillaren erleichtern das Eindringen des Regenwassers, sodaß der Sandboden sich immer zu sättigen vermag. Der geringe Wassergehalt und die damit verbundene schnellere Erwärmbarkeit des Bodens werden die Verdunstung des Wassers steigern, somit eine schnellere Austrocknung des Bodens herbeiführen; jene ist wieder, wie wir noch sehen werden, bestimmend für die Größe der Abspülung durch das Regenwasser. Lehmböden dagegen bestehen aus einer Mischung von Sand und tonigen Bestandteilen; sie neigen zur Krümelbildung. Infolgedessen ist der Wassergehalt im allgemeinen sehr groß, die Permeabilität sehr gering. Wegen des großen Wassergehaltes wird auch die Verdunstung und Erwärmung des Bodens eine geringere sein als bei sandigen Böden, was sich in einer geringeren Abspülungsmenge durch das Regenwasser bemerkbar machen wird.

Wir wollen in diesem Abschnitt versuchen, auf dem Wege der induktiven Methode, d. h. vom Einzelgegenstand und seiner Betrachtung ausgehend, zu einem Gesamtbild der Abtragung durch den Regen zu gelangen.

## Die Bedingungen der Abspülung.

1. Wir hatten bereits festgestellt, daß die Neigung des Gehänges, die Inklination, bestimmend ist für die Menge der Abtragung durch den Regen. Je steiler sie ist, um so größere Mengen werden abgespült. „Steile Gehänge werden also schneller abgeflacht als flache.“*) (Vergl. Tabelle 1 Seite 36.) Bei einer Neigung der Fläche von 30 ° werden fast die doppelten Mengen Bodenteile abgespült als bei einer Neigung von 20 °.

2. Die Exposition, d. h. die Lage eines Hanges zur Himmelsrichtung, ist maßgebend für die Menge und Art der Be-

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd. 2. Heft, S. 31.

regnung und Abtragung. Wie schon festgestellt wurde, werden die einer Regenwindrichtung zuliegenden Flächen am meisten beregnet.

3. Die Stärke der Abtragung ist ferner abhängig von der Bodenart und Gesteinsbeschaffenheit. „Durch sie wird die örtliche Mannigfaltigkeit der Denudation bestimmt." *) Wir haben die Unterschiede von sandigen und lehmigen Böden kennengelernt und ihr Verhalten dem Wasser gegenüber geprüft. Nun, in der freien Natur werden wir es aber noch mit anderen Faktoren zu tun haben, die die Art und Menge der Abspülung durch das Regenwasser bestimmen. Die verschiedene Widerstandsfähigkeit eines Gesteins setzt sich nach Philippson**) zusammen: aus der Härte, der Zerklüftung, Schichtung, der Witterung und Durchlässigkeit für Wasser. Diese verschiedenen Faktoren sind aber noch keinesfalls genügend in ihrer Wirksamkeit auf die Denudationsformen erkannt. —

Von besonderer Wichtigkeit ist vor allem: die Durchlässigkeit eines Gesteins; durchlässige Gesteine unterliegen wenig der Abspülung, da sie alles Wasser in sich aufnehmen und es nicht an der Oberfläche abrinnen lassen. Ein undurchlässiges Gestein wird dagegen stärker abgespült, auch wenn es hart ist, da alles Wasser an der Oberfläche abrinnt.

4. Eine Vegetationsdecke vermindert die Abtragung durch den Regen, d. h. „sie schützt bis zu einem gewissen Grade den Boden vor Abspülung; je dichter sie ist, desto mehr." ***)

Wir erhalten bei unseren Messungen ein ungefähres Verhältnis von 1 : 20. (Vergl. Tabelle 1 auf Seite 36.) Auf den Einfluß der Bodenbedeckung soll in einem besonderen Kapitel näher eingegangen werden. Wir stellen vorläufig fest, daß eine Vegetationsdecke (Gras) den Boden vor der Abtragung schützt und zwar wird dies umsomehr der Fall sein, je dichter und geschlossener sie ist. Eine Abtragung wird aber niemals vollständig unterbunden. „In einem gleichmäßig feuchten Klima mit geschlossener Pflanzendecke kommt es nur wenig zur Bildung von Regenrissen und Runsen. — — Die Hänge treten uns geschlossen und glatt, nur durch einzelne Tälchen zerschnitten, entgegen. In trockenen Gegenden mit periodischen Regen und lockerer Pflanzendecke sind die Hänge bis ins Einzelne hinein von Schluchten und Runsen durchsetzt und reich modelliert." †)

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Band 2. Heft Seite 33.
**) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd. 2. Heft, S. 36. ***) ebenda S. 34.
†) Hettner: Die Oberflächenformen des Festlandes, ihre Untersuchung und Darstellung. Leipzig u. Berlin 1921. Seite 78.

Tabelle 1.

## Abtragungen des Regens bei verschiedener Neigung der Fläche und Vegetationsbedeckung.

| Datum | Regen-Menge mm | Expo-sition | Nei-gung | abgetragener Sand in g mit Gras-bedeckung | abgetragener Sand in g ohne Gras-bedeckung | Regenart |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 18. 9. | 4,6 | Nord | 30 ° | 1,5 g | 39,5 g | Schauer |
| 20. 9. | 16,5 | „ | „ | 2,0 | 48,0 | Landregen |
| 24. 9. | 1,2 | „ | „ | — | — | Schauer |
| 27. 9. | 6,1 | „ | „ | 0,0 | 7,0 | Landregen |
| 2. 10 | 6,6 | „ | „ | 3,0 | 37,0 | Gewitter |
| 10. 10. | 1,1 | „ | „ | — | — | Schauer |
| 17. 10. | 4,8 | „ | „ | 1,0 | 27,0 | Landregen |
| | 40,9 mm | | | 7,5 g | 158,5 g | |

| | mm | | | | b. 20 ° | b. 30 ° | Neigung: |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18. 10. | 8,6 | Nord | 20 ° | 1,5 | 29,0 | 41,5 | Gewitter |
| 19. 10. | 4,1 | „ | „ | 0,5 | 13,5 | 21,5 | Gewitter |
| 22. 10. | 7,4 | „ | „ | 0,0 | 7,5 | 22,0 | Landregen |
| 23. 10. | 3,3 | „ | „ | 0,0 | 4,5 | 14,5 | Landregen |
| 25. 10. | 4,5 | „ | „ | 0,5 | 11,5 | 18,5 | Schauer |
| | 27,9 mm | | | 2,5 g | 66,0 | 118,0 g | |

Es stellt sich heraus:

1. daß eine Vegetationsdecke (Gras) die Abspülung im bedeutenden Maße verhindert. (Ungefähres Verhältnis 1 : 20).
2. daß die Neigung des Hanges, Regenart und Menge maßgebend ist.
3. daß bei einer Neigung der Fläche (ohne Veg.-Bedeckung) von 30 ° fast die doppelten Bodenmengen abgeführt werden als bei einer Neigung von 20 °.

(Die angegebenen Werte sind auf halbe und ganze g abgerundet.)

5. Für die Abtragung ist ferner die Häufigkeit und die Art der Niederschläge von Wichtigkeit. „Bei gleicher jährlicher Regenmenge wirken heftige Regengüsse stärker abspülend als sanfte, wenn auch langandauernde Regenfälle." *)

(Vergl. Tabelle 3 am 2. 10., 18. 10. und 19. 10.

Es zeigt sich, daß die Gewitterregen jedesmal eine größere Abtragung hervorrufen als die Land- und Schauerregen. Auch die Art und Geschwindigkeit des Wasserabflusses ist bei starken und schwachen Regenfällen eine verschiedene. „Starke Regengüsse wirken flächenspülend, schwache Regen dagegen vermögen die Hänge mit tausenden von tiefen Rillen und Runsen zu überziehen". **)

Die erhöhte Abspülung bei starken Regengüssen wird durch folgende Tatsachen bedingt:

Gewitterregen gehen in kurzer Zeit großtropfig nieder, meist sind sie von starken Winden begleitet. Die großen Regentropfen rufen auf den Gehängen infolge ihrer Größe und Schwere und durch ihre vermehrte Fallgeschwindigkeit eine erhöhte Aufschlagskraft hervor; d. h. der Boden wird in stärkerem Maße angegriffen und gelockert als bei sanftem Landregen. Hand in Hand mit dieser Wirkung geht die riesige Wassermenge, die in kurzer Zeit den Boden benetzt und die keine Zeit und Gelegenheit findet, in ihn einzudringen. Sie wird zu einem schnellen oberflächlichen Abfluß gezwungen, wodurch wieder eine erhöhte Abspülung infolge der Geschwindigkeit und großen Wassermasse hervorgerufen wird. — Landregen dagegen, die sanft und allmählich niedergehen, haben Zeit, in den Boden einzudringen, ihn langsam zu sättigen und ihn vor einer energischen Abtragung zu schützen. Der Boden gewinnt durch allmähliche Abgaben von Wasser an tiefere Schichten immer wieder die Fähigkeit, von neuem Wasser aufzuspeichern. Erst wenn der Boden gesättigt ist, beginnt eine Abtragung, die dann aber keine große sein wird, da sich eine Verschlämmung der obersten Bodenschichten einstellen wird, die der Abspülung die Arbeit erschweren. (Vergl. Tabelle 3 am Schluß.)

6. Von großem Einfluß für die Abspülung durch den Regen ist ferner die Jahreszeit, in der sie geschieht. Unsere Betrachtungen beziehen sich hier nur auf Mitteleuropa, einem Gebiet der gemäßigten Zone, mit einem markanten Wechsel der Jahreszeiten in thermischer Hinsicht. Es regnet bei uns während des ganzen Jahres. Das Maximum des Niederschlags liegt z. Zt. der höchsten Temperatur. Im allgemeinen gleicht sich das Klima in Mittel-

*) Philippson: 2. Bd. 2. Heft Seite 34.
**) E. Obst: Grundzüge einer geogr. Landeskunde. Hambg. 1923. II. S. 24.

europa aus, nur im NW. macht sich die Nähe des Meeres, im Osten eine größere Kontinentalität bemerkbar. Wir haben im NW. milde Winter und viel Regen zu allen Jahreszeiten, im Osten kalte Winter und heiße Sommer, in denen die Hauptregenzeit fällt. Von entscheidender Wirkung für die Abtragung und den Abfluß des Regenwassers ist die zeitliche Verteilung (d. h. die Jahreszeiten). Auch Trocken- und Regenperioden zeigen der Abtragung gegenüber verschiedenes Verhalten.

Wie wir in Abschnitt 1 b sahen, sind die Regenrillen meist nur eine vorübergehende Erscheinung. Sie fallen in längeren Trockenperioden in sich zusammen infolge der Austrocknung und der Tätigkeit des Windes. Ein neu einsetzender Regen findet dann Verhältnisse vor, die den Abfluß des Wassers erschweren, aber die Abspülung erhöhen. Das Regenwasser wird sich erst wieder neue Bahnen und Rinnen formen müssen, wenn es nicht teilweise flächenhaft abfließt. Es wird sich vielfach infolge des Mangels an ausgebildeten Regenrillen aufstauen, es werden sich Pfützen und Tümpel bilden, die rasch infolge der Trockenheit der Luft und des Bodens vertrocknen und einsickern.

In der Regenzeit herrschen Zustände, die den Abfluß des Regenwassers fördern; Regenrinnen sind schon ausgebildet, Hindernisse sind beseitigt. Es entstehen immer neue Rinnen, die größere Wassermassen abführen. Der Boden ist völlig gesättigt und durchfeuchtet, kann infolgedessen kein Wasser mehr in sich aufnehmen, der Abfluß wird dadurch erheblich stärker. Maßgebend wird aber auch noch für diese Vorgänge in der Trocken- und Regenzeit vor allen Dingen der orographische Bau des Bodens sein. Ein steiles Gehänge hat, wie wir gesehen haben, einen schnelleren Abfluß des Wassers zur Folge, und meist wird die den Abfluß hemmende Wirkung einer Trockenperiode durch das steile Gefälle aufgehoben. Das Wasser wird infolge seiner durch die Steilheit erlangten Geschwindigkeit gar keine Gelegenheit haben, in den Boden einzudringen. Wir können also annehmen, daß in den Gebirgen meist Zustände herrschen, die den Abfluß fördern. Im allgemeinen unterliegt der trockene und ausgetrocknete Boden einer größeren Abtragung durch den Regen und Wind als der feuchte, denn die einzelnen Bodenteile befinden sich bei ersterem in einem Stadium der Lockerung, des losen Aneinanderliegens. „Wechsel von Trockenperioden mit Zeiten kräftiger Regen verstärkt die Abspülung, da nach einer Trockenperiode der Boden bezw. Fels durch mechanische Verwitterung gelockert zu sein pflegt." *)

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd. 2. Heft Seite 34.

Wie liegen die Verhältnisse in unseren Jahreszeiten? Der Herbst ist wohl allgemein die Jahreszeit, in dem der Boden am meisten ausgetrocknet ist. Die Niederschläge vermindern sich, es stellen sich längere Trockenperioden ein. Wir stellen oft auf Feldern eine überaus trockene Bodenoberfläche fest, die verhältnismäßig tief eindringt. Die dem Winter vorausgehenden stärkeren Niederschläge finden dann ein reiches Abtragungsmaterial vor; so ist der Herbst für die Abtragung durch den Regen und den Wind die günstigste Jahreszeit.

Im Sommer haben wir andere Verhältnisse. Im allgemeinen herrschen größere Niederschläge, Landregen und Gewitterregen, die selten auf größere Zeit aussetzen. Der Boden weist trotz der Wärme und Verdunstung durch den Wasserverbrauch der Vegetation einen verhältnismäßig feuchten Zustand auf, der den Abfluß befördert, die Abspülung jedoch erschwert.

Der gefrorene Boden im Spätherbst und Winter besitzt für die Abspülung gar keine morphologische Bedeutung. Er läßt alles Regenwasser abrinnen, ohne daß dieses den Boden angreifen könnte; er schützt den Boden gewissermaßen vor der Abtragung. Taut der Boden jedoch auf, so lockern sich nach meinen Beobachtungen die Bodenteilchen im höchsten Grade. Der Boden wird dann bei eintretenden Regenfällen sehr leicht abgespült.

Im Frühjahr liegen ebenfalls für den Abfluß günstige Verhältnisse vor. Der nicht mehr gefrorene und aufgetaute Boden besitzt eine sehr große Feuchtigkeit, sodaß er nur sehr wenig Wasser aufnehmen kann. Treten im Frühjahr heftige Regengüsse auf, so erzeugen sie rasch ansteigende Hochwasser. Im allgemeinen wird in dieser Jahreszeit eine geringere Abtragung stattfinden als im Sommer. „Für die Wirksamkeit der Abspülung ist nicht so sehr die jährliche Regenmenge als ihre jahreszeitliche Verteilung und Regendichte maßgebend, sodaß unter verschiedenen klimatischen Bedingungen im selben Gestein verschiedene Formen zustandekommen. Während im Flysch der Nordalpen Kriech- und Rutschvorgänge herrschen, entstehen im gleichen Gestein im Mittelmeergebirge stets neue vielverzweigte Regenrisse, die sogenannten Racheln." *)

7. Wichtig ist für die Abspülung durch den Regen ferner der Zustand des Bodens, in welchem Maße er verwittert ist. Je lockerer das Gesteinsgefüge ist, um so leichter und schneller wird es bei kräftigen Regenfällen von den Hängen abgespült werden. Wind und Regen führen die gelockerten Partikel fort und setzen stets neue Oberflächen den atmosphärischen Niederschlägen aus.

*) Machatschek: Morphologie III 1919. Seite 31.

Stellen wir zum Schluß noch einmal die Bedingung für eine günstige Abtragung durch den Regen zusammen: Der Hang besitzt eine große Neigung und eine günstige Exposition. Sein Bodenmaterial besteht hauptsächlich aus lockeren, grobkörnigen Bestandteilen, die zum Verschlämmen und zur Krümelbildung nicht geeignet sind. Der Hang ist vegetationslos. Die größte Abtragung tritt bei einem lockeren Zustand des Bodens, im Herbst auf, hervorgerufen durch plötzlich einsetzende, rasch fallende starke Regen, Gewitterregen.

Das sind die Vorbedingungen, die für eine Abtragung überhaupt in Frage kommen. Je besser sie sind, um so größer ist die Abtragung; wir werden jedoch sehen, daß diese Faktoren sich gegenseitig aufheben können, und daß bei den Vorgängen der Abtragung noch andere Faktoren eine Rolle spielen.

## In welchem Maße werden die Hänge abgetragen?

Wie wirken sich nun alle diese Bedingungen bei einem Regen auf einem vegetationslosen Hange aus? Wie arbeiten sie zusammen, und wie heben sie sich auf? Wir wollen zunächst von den positiv gefundenen und ermessenen Ergebnissen ausgehen, sie betrachten und sie schließlich am Ende dieses Abschnittes zu begründen versuchen. Auf die entstehenden Formen in der Landschaft werden wir später in einem besonderen Kapitel zu sprechen kommen.

Es stellt sich heraus:

1. Am meisten beregnet werden durchschnittlich die Nordseite, es folgen in absteigender Linie die West-, Ost- und Südseite. Wie wir schon erwähnten, handelt es sich bei uns in Mittel-Europa hauptsächlich um West- bezw. NW-Regenwinde. Die Größe der Benetzung einer Fläche ist abhängig von der Windrichtung oder von der Exposition der Fläche. Die Tabelle 3 am Schluß zeigt uns deutlich das Vorherrschen der nördlichen bezw. westlichen Regenwinde. Von 16 Regenfällen, die in der Messungszeit fielen, waren 11 von Nord- bezw. West- oder NW.-Winden begleitet.

2. Die Tabelle 3 zeigt ferner, daß auf der Sandpyramide eine größere Bodenmenge, fast die doppelte, durch den Regen abgetragen wird als auf der Lehmpyramide. Bedingt wird diese größere Abspülung beim Sand durch die lockere Lagerung der Bodenpartikel, durch das Nichtvorhandensein einer Krümelstruktur. Die Bodenteilchen werden durch das aufschlagende und abfließende Regenwasser sehr leicht gelockert, in Bewegung gesetzt und abgespült.

Es sind durch den Regen bei 75,1 mm Niederschlag 1,261 g Sand und 708 g Lehm auf der gesamten Pyramide abgetragen worden. Das ergibt durchschnittlich für 1 mm Regen ca. 16,8 g Sand und ca. 9,5 g Lehm. Die Mengen verhalten sich bei Sand und Lehm wie 1,8 zu 1,0.

3. Wir stellen ferner fest, wie die Messungen auf Tabelle 3 ergaben, daß die Ostseiten am stärksten der Abtragung durch den Regen unterliegen. Es folgen in absteigender Linie die Südseite, die Nordseite und schließlich die Westseite. Die relativ am wenigsten beregneten Ost- und Südseiten weisen eine größere Abtragung auf.

Bei dem 75,1 mm Niederschlag, der in der Messungszeit fiel, wurden abgetragen:

398,5 g Sand bezw. 194,5 g Lehm auf der Ostseite,
333,0 g „ „ 179,5 g „ „ „ Südseite,
276,5 g „ „ 172,0 g „ „ „ Nordseite,
253,0 g „ „ 162,0 g „ „ „ Westseite.

Der Vorrang der Ost- und Südseite in der Abtragung tritt klar zu Tage. Da die Nord- und Westseiten am meisten beregnet werden, so würden wir auf ihnen die größten Abtragungsmengen erwarten. Wir haben es hier mit noch anderen Erscheinungen zu tun, die die Wirkung des Regenwindes aufheben bezw. vermindern.

4. Erwähnt sollen hier noch werden die Wirkungen des Windes vor einem Regen oder während zweier Regenfälle. Wie die Messungen ergaben, wurde die Südseite am stärksten vom Winde angegriffen und abgetragen. (Vergl. nachstehende Tabelle.)

Tabelle 2.

Abtragungen durch Wind.

| Datum | Beschaffenheit d. Bodens | abgetragene Sandmassen in g | | | | abgetragene Lehmmassen in g | | | | Wind |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Nord | West | Süd | Ost | Nord | West | Süd | Ost | |
| 26.9. | trok-ken | 2,5 | 10,5 | 25,0 | 1,5 | — | — | — | — | Süd (ger.) |
| 1.10. | „ | 1,5 | 3,0 | 97,0 | 8,5 | — | — | — | — | SW. stark |
| 14.10. | „ | 18,5 | 208,0 | 345,0 | 22,0 | — | — | — | — | W. stark |
| | | 22,5 | 221,5 | 467,7 | 32,0 | | | | | |

Die Tabelle auf umstehender Seite zeigt, daß die Südseite und die Westseite am stärksten der Abtragung durch den Wind unterliegen.

(Die angegebenen Werte sind auf halbe und ganze Gramm abgerundet.)

Am zweitstärksten wurde die Westseite vom Winde abgetragen. Die Tabelle zeigt uns den deutlichen Vorrang der Südseite trotz des Vorherrschens westlicher Winde. Der Windrichtung nach dürften wir auf der Nord- und Westseite, die für die Wirkung des Windes die günstigste Exposition haben, die größten Abtragungsmengen erwarten.

5. Für die Abtragung durch den Regen sind ferner die Regendauer und -Menge, sowie die Regenart, wie schon erwähnt worden ist, von Bedeutung. Kurze und starke Regenfälle (Gewitter und Platzregen) greifen den Boden im allgemeinen stärker an als kleinere, sanfte Regenfälle (Land- evtl. Schauerregen), deren Wassermengen zu stark vom Boden aufgenommen werden. (Vergl. Tabelle 3 am Schluß.)

6. Starken Einfluß auf die Menge der Abtragung durch den Regen haben die Windverhältnisse bei einem Regen; d. h. starke Winde, die einen Regen begleiten, rufen auf der der Regenwindrichtung zuliegenden Seite, wie schon erwähnt wurde, eine erhöhte Abtragung hervor, was scheinbar nur bei kräftigen Regengüssen wie Gewitter- und Platzregen der Fall ist. (Vergl. Tabelle 3: am 2. 10., 18. 10. und 19. 10.) Die vermehrte Abtragung ist bedingt durch das kräftigere Einschlagen der Regentropfen auf den Boden und durch die erhöhte Kraft des abfließenden Wassers infolge der großen Wassermengen.

7. Neben diesen Wirkungen spielen die Feuchtigkeitsverhältnisse des Bodens, d. h. Trockenheit und Feuchtigkeit vor einem Regen, die größte Rolle für die Menge der Abtragung.

## Die Erklärung.

Wir haben die Bedingungen und die Tatsachen der Abtragung kennengelernt; aus ihrer Kombination versuchen wir, durch ihr gegenseitiges Zusammenwirken und Sichaufheben, ein einheitliches Bild von der abtragenden Kraft des Regens auf einem Hange zu erhalten.

Wie wir unter 7. erwähnten, ist der Feuchtigkeitszustand eines Bodens vor dem Regen maßgebend und für die Größe der Abtragung der Hänge mitbestimmend. Ein feuchter

Boden erschwert die Abspülung, ein trockener begünstigt sie, d. h. ein feuchter Boden besitzt ein festeres Gefüge der einzelnen Bodenteilchen, hervorgerufen durch die anziehenden Kräfte von Wasser und Bodenpartikeln. Man kann sich davon sehr leicht überzeugen durch Berieselung zweier gleich großer und verschieden feuchter Flächen und durch die Messung der Abtragungsmengen. Ein feuchter Boden kann durch vorangegangene Regenfälle an seiner Oberfläche evtl. noch verschlämmt sein. Er schützt so die darunter liegenden Schichten vor einer schnellen Verdunstung, vermindert ein starkes Abspülen durch das Regenwasser, da die einzelnen Bodenteile in ihrer festen Gebundenheit dem aufschlagenden und abfließenden Regenwasser zu große Widerstände bieten. Ein trockener Boden befindet sich dagegen in einem Zustand der Lockerung seiner Bodenpartikel, der die Arbeit des Windes und des Regens in höchstem Maße begünstigt. Bei den Messungen an den Pyramiden zeigte sich, daß sich durchschnittlich die Nord- und Westseiten feuchter erhielten als die Ost- und Südseiten, was für die Sand- und Lehmpyramide galt. Aus diesem Umstande heraus soll die größere Abtragung auf der Süd- und Ostseite erklärt werden.

Daß die Feuchtigkeit eines Bodens eine Abtragung durch das Regenwasser verringert, haben wir bereits schon festgestellt. Die Tabelle 3 zeigt das sehr deutlich: man vergleiche die Abtragungsmengen am 18. 9. und 25. 10. Bei derselben Regenmenge werden recht verschiedene Mengen an den einzelnen Regentagen abgetragen, je nach dem Feuchtigkeitszustand des Bodens.

### Wie kommt es, daß sich die N.- und die W.-Seiten feuchter erhalten als die S.- und O.-Seiten?

Zunächst werden ja die ersteren bedeutend stärker beregnet, sie erhalten also größere Wassermengen und werden stärker durchfeuchtet. Um die Folgeerscheinungen zu erklären, werden wir ganz kurz den täglichen Gang der Temperatur und die damit verbundene Verdunstung betrachten müssen, denn sie sind schließlich zusammen mit dem Wind für die Größe der Austrocknung maßgebend. „Ist der Boden feucht, so wird ein Teil der zugestrahlten Wärmeenergie zur Verdunstung verbraucht, geht also für die Temperatursteigerung der Oberfläche und für die Erwärmung des Bodens verloren." *)

Nach Ramann **) ist die Verdunstung des Wassers abhängig von meteorologischen Einflüssen, von der physikalischen Be-

*) Geiger: Das Klima d. bodennahen Luftschicht. 1927. S. 12.
**) Ramann: Bodenkunde 1905 S. 259.

schaffenheit und Zusammensetzung des Bodens, der Lage nach Himmelsrichtung und Horizont und von der Bodenbedeckung. — Am wichtigsten für die Verdunstung sind: Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftbewegungen. „Außer den klimatischen Besonderheiten wirkt hauptsächlich die Bodenbeschaffenheit, die Durchlässigkeit und Gestalt der Oberfläche darauf ein, ob die Verdunstung ein großes oder geringes Maß erreicht." *)

Je höher die Temperatur ist, um so größere Wassermassen vermag die Luft aufzunehmen. **) Die Verdunstung steigt also mit der Temperatur. Bekanntlich erreicht letztere bei normalem Gange nach Hann im Laufe des Tages ihr Minimum um Sonnenaufgang, ihr Maximum um 2 Uhr nachmittags. Die größten Wassermassen dürften also vorläufig nach dem Maximum von der Erdoberfläche verdunstet werden. Es folgt aber der tägliche Wärmegang keinesfalls regelmäßig dem Sonnenstande; durch die Winde, Regen und Bewölkung treten unregelmäßige Aenderungen ein, die den Einfluß höherer Temperatur mehr oder weniger vermindern.

Luftbewegungen fördern im allgemeinen die Verdunstung und Austrocknung der Böden. Die Bodenoberfläche wird bei ruhiger Luft die benachbarte Luftschicht mit Wasser zu sättigen versuchen. Bei bewegter Luft werden schnell immer neue, ungesättigte Luftteile mit der verdunstenden Oberfläche in Berührung und zum Austausch gebracht, und somit steigert sich die Verdunstung. Am günstigsten sind warme, trockene Winde. Die einzelnen Bodenarten verhalten sich der Verdunstung und Austrocknung je nach den physikalischen Eigenschaften ***) recht verschiedenartig gegenüber. „Je durchlässiger der Boden und je stärker die Schicht ist, die das versickerte Wasser aufnimmt und den Grundwasservorräten zuführt, je tiefer unter der Oberfläche diese liegen, um so besser wird das in den Untergrund versunkene Wasser gegen rasche Verdunstung geschützt. Ein Teil hiervon geht durch Bodenverdunstung und Pflanzenverbrauch wieder in Dampfform zurück, der andere Teil dient zur Speisung der Bäche und Flüsse, oft mit langer Verzögerung des Abflusses." †) Es sei vorausbemerkt, daß sich die Lehmpyramide wegen ihrer großen aufgespeicherten Wassermenge deutlich feuchter erhielt als die Sandpyramide. Die Feuchtigkeitsverhältnisse wurden alle Tage beobachtet.

*) H. Keller: d. Abflußerscheinungen i. Mitteleuropa. Geogr. Zt. 1906 S. 695.

**) Ramann: Bodenkunde S. 259.

***) Ramann: Bodenkunde S. 260.

†) H. Keller: d. Abflußerscheinungen i. Mitteleuropa. Geogr. Zt. 1906 S. 695.

Eine größere Rolle spielen aber in Beziehung auf Erwärmung, Verdunstung und Trockenheit des Bodens die Exposition und Inklination eines Hanges. Keine natürliche Erdoberfläche ist völlig eben. Die Rauhheit der Oberfläche schafft geneigte Flächen im kleinsten Ausmaß. Auf ihnen ist das Maß der Sonnenstrahlenabsorption ein verschiedenes. Auf einem auf dem Boden liegenden Steinchen lassen sich Sonnen- und Schattenseite unterscheiden, wie im großen an einem Berg. *)

Die Absorption der Sonnenstrahlung durch die Erdoberfläche hängt bei geneigtem Boden von der Richtung und der Größe der Neigung ab. „Diese Hangrichtung und Hangneigung bestimmt, wenn wir große Verhältnisse ins Auge fassen, die Klimaunterschiede verschiedener Bergseiten. Ihr Einfluß macht sich aber schon in den kleinsten Verhältnissen geltend. Auf der Nord- und Südseite einer Ackerfurche herrschen wesentlich verschiedene Temperaturen."**)

Je nach der Größe der Belichtung und Erwärmung wird die Verdunstung einer Bodenfläche eine verschiedene sein, durch sie ändert sich der Feuchtigkeitszustand. Aus dem bekannten Gange der Sonne über dem Horizont eines bestimmten Ortes läßt sich die Dauer des Sonnenscheines für einen Hang von bestimmter Richtung und Neigung in seiner Abhängigkeit von der Jahreszeit berechnen. R. Geßler***) hat solche Berechnungen für eine geographische Breite von 45° auf der Nordhalbkugel durchgeführt. Daraus folgt, daß eine gegen Osten gerichtete Fläche im Laufe des ganzen Tages theoretisch die gleiche Sonnenstrahlung empfängt wie die Fläche, die symmetrisch zur Nord-Südlinie in gleicher Weise nach Westen gerichtet ist; diese erhält den Hauptteil ihrer Bestrahlung am Nachmittag, die andere am Vormittag. Eine zweite Symmetrie schafft die Jahreszeit, indem einem Tage im Frühjahr ein Tag im Herbst bei gleicher Bestrahlungsstärke entspricht. Betrachten wir nach Geßler kurz die Verhältnisse der Jahreszeiten. Im Hochsommer: Die Bestrahlungsstärke nimmt für den günstigsten südlichen Hang mit zunehmender Neigung nicht zu, sondern ab; am Morgen und am Abend bei ihrer im Hochsommer weit nach Nord-Ost und Nord-West ausgedehnten Bahn kann die Sonne die südlichen Hänge umsoweniger erreichen, je steiler an ihnen die Inklination ist. Zu Mittag ist aber in unseren Breiten die Bestrahlungsintensität mit

*) R. Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht 1927 S. 31.
**) Geiger: Das Klima d. bodennahen Luftschicht. S. 99.
***) R. Geßler: Die Stärke d. unmittelb. Sonnenstrahl. d. Erde in ihrer Abhängigkeit v. d. Auslage unter versch. Breiten u. zu versch. Jahreszeiten. Abhdlg. d. Pr. Met. Inst. 8. 1925. Nr. 1.

zunehmender Inklination vergrößert. Theoretisch wird durch jene Verkürzung der Bestrahlungsdauer am Morgen und Abend mehr verloren, als durch die größere Intensität am Mittag gewonnen wird. Auch bei anderen Hangexpositionen macht sich der Neigungseinfluß erst bei ganz großen Neigungen, wie sie in der Natur nur selten vorkommen, bemerkbar. Im Hochsommer sind die verschiedenen Expositionen wenig unterschieden. Im Herbst sind die südlichsten Expositionen am günstigsten bestellt, die nördlichsten am ungünstigsten. Bei 30° Neigung erhält die Nordseite überhaupt kein direktes Sonnenlicht.

Wenig berücksichtigt bleibt nach Geiger bei diesen theoretischen Betrachtungen und Berechnungen von Geßler die in verschiedenen Sonnenhöhen verschiedene Schwächung der Strahlungsintensität durch die Diffusion und die Absorption in der Erdatmosphäre.*) Nach Geiger gehen die Strahlungswirkungen am Morgen und Abend mit zu hohem Betrag in die Berechnung ein. „Der Einfluß des Tagesganges der übrigen meteorologischen Elemente bleibt außer Acht. Diese bedingen einmal eine stärkere Schwächung der Strahlungsintensität der Sonne am Nachmittag gegenüber dem gleichen Zeitpunkt am Vormittag, weil die Atmosphäre durch die bei Tage mit den aufsteigenden Konvektionsströmen emporgeführten Staubmassen nachmittags einen höheren Trübungsgrad aufweist als vormittags." **)

A. Kerner***) hat die Temperaturen auf den verschiedenen Expositionen gemessen. Es zeigen sich Abweichungen von den theoretischen Betrachtungen: die größten Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Hangrichtungen fallen im Sommer entgegengesetzt den theoretischen Erwartungen. Die kälteste Hangrichtung ist die rein nördliche. Die Lage der wärmsten Hangrichtungen wechselt aber im Laufe des Jahres; von Januar bis März liegt das Temperaturmaximum im Südwesten, wandert rasch nach Südosten (Juni), im Laufe des Sommers und Herbstes: Rückwanderung nach Südwesten.

Fritsch†) verlegt das Temperaturmaximum im Sommer nach Südosten; als Ursache nimmt er ein nachmittägliches Bewölkungsmaximum im Sommer an. Besonders im Gebirge bringt der Nachmittag auch bei heiterem Tage Bewölkuug („Schönwetter-

*) Geiger: Seite 103.
**) Geiger: Seite 103.
***) A. Kerner: Ueber Wanderung des Maximums d. Bodentemp. Met. Z. 1871. Seite 65.
†) Fritsch: Ein Beitr. zur Erklär. d. Wanderung d. Maximums d. Bodentemperatur. Met. Z. 1871. Seite 151.

cumuli"), öfter Gewitter und Niederschläge. Diese regelmäßige Verminderung der Bestrahlungsintensität führt am Nachmittag zur Verlegung des Temperaturmaximums nach Südosten. Nach diesen kurzen Betrachtungen tritt uns die bevorzugte Lage der östlichen und besonders der südlichen Hänge in ihrer Erwärmung klar zu Tage. Die Feuchtigkeitsverhältnisse verhalten sich den Erwärmungsvorgängen entsprechend; die besterwärmten Böden weisen demnach die größte Trockenheit auf. H. Keller*) sagt darüber: „Die große Verschiedenheit der Landverdunstung in der kalten und warmen Jahreshälfte läßt keinen Zweifel, daß letzten Ortes die Verschiedenheit der Temperatur jene kräftigen Einwirkungen auf die Größe der Verdunstung ausübt. — Daß die Größe der Verdunstung vorwiegend von den Niederschlägen abhängig sei, kann für die örtlichen Aenderungen der Beziehungen zwischen Niederschlag und Verdunstung nicht gelten."

Es wird nach diesen Betrachtungen aber auch von Wichtigkeit sein, zu wissen, wann im Durchschnitt die Niederschläge an den einzelnen Tagen fallen, und wie die tägliche Periode der Niederschläge beschaffen ist. „Den verbreitesten täglichen Gang der Niederschlagsmenge repräsentiert die zweite kontinentale Gruppe (Pawlonsk, Berlin, Prag, Wien, Bukarest usw.) mit einem Hauptmaximum am Nachmittage und einem sekundären Maximum in den frühen Morgenstunden. — Das Hauptmaximum tritt zwischen Mitternacht und 4 Uhr ein, ein zweites zwischen 8 Uhr und Mittag." **) Das heißt also: Die Tageszeiten der reichlichsten Niederschläge sind demnach die kältesten und die wärmsten Tagesstunden.

Die Niederschlagsmaxima der späten Nachmittagsstunden verdanken nach Hann***) der aufsteigenden Bewegung der Luft über den Landflächen ihrer Entstehung, die nächtlichen Regenfälle dagegen der nächtlichen Abkühlung durch Wärmeausstrahlung einer dampfreichen, der Sättigung nahen Atmosphäre. Die Zeit der raschesten Erwärmung der Atmosphäre von oben her durch die Sonne und von unten durch den erwärmten Erdboden sind der Regenbildung an günstigsten. — Die größten Niederschlagsmengen finden demnach am Nachmittag die Böden der Ost- und Südseiten in einem durch die am Vormittag erfolgte starke Bestrahlung relativ trockenen Zustande vor.

*) H. Keller: Die Abflußerscheinung. i. Mitteleuropa. Geogr. Z. 1906. S. 691.

**) Hann: Lehrb. d. Met. 1926 4. Aufl. S. 349.

***) Hann: Lehrbuch d. Met. 4. Aufl. 1926 S. 350.

Wollny*) behandelte ebenfalls Exposition und Inklination und kommt zu folgenden Ergebnissen: „Bei verschiedener Lage des Bodens gegen die Himmelsrichtung sind die nördlichen Seiten am feuchtesten, dann folgt die Westseite, hierauf die Ostseite, während die Südseite die geringste Wassermenge enthält." Ich habe, wie schon erwähnt, dieselben Feststellungen gemacht. Die Feuchtigkeitsmessungen wurden um 9 Uhr vormittags und nachmittags an den Pyramiden vorgenommen. Die Nordseite wies durchweg zu allen Tageszeiten die größte Feuchtigkeit auf, die Südseite war immer die trockenste. Schwierig dagegen war die Beurteilung bei der Ost- und Westseite. Bei den Beobachtungen, die morgens geschahen, stellte es sich heraus, daß die Ostseiten sehr oft eine größere Feuchtigkeit aufwiesen als die Westseiten. Bei den Messungen am Nachmittag zeigte sich immer das Gegenteil: Die Westseite war stets feuchter als die Ostseite. So scheint im Laufe des Tages die Feuchtigkeitsdifferenz sich von der Ostseite nach der Westseite zu verschieben. Dies hängt neben den Erwärmungs- und Verdunstungsvorgängen bei Tage scheinbar auch mit der nächtlichen Wärmeausstrahlung in Zusammenhang. Sicher ist das, daß die Sonnenwärme in den Morgenstunden auf die Ostseite noch keinen austrocknenden Einfluß ausübt, daß sich aber dieser erst im Laufe des Vormittags und Mittags auf der Ostseite vergrößert, sie verhältnismäßig schnell erwärmt und austrocknet, schneller als die Westseite am Nachmittag.

Daß die Südseite am trockensten ist, verwundert uns nicht; sie erhält, wie nachgewiesen wurde, den wenigsten Regen und die günstigste Sonnenstrahlung. Die Nordseite bleibt wegen ihrer starken Beregnung am feuchtesten; bei großer Neigung der Fläche übt die Sonnenstrahlung auf den Boden gar keinen Einfluß mehr aus. — Daß die Ost- und Südseiten sich trockener erhielten, bewiesen die vielen und großen Risse auf der Lehmpyramide, die ihre Oberfläche durchzogen, nach kräftigen Regenfällen verschwanden, später wieder auftraten.

Wir haben bis jetzt die Abtragungsdifferenzen durch den Regen kennen gelernt, und sie durch den Grad der Feuchtigkeit des Bodens zu erklären versucht. Betrachten wir aber diese Dinge näher, so stoßen wir schon auf die ersten Schwierigkeiten. Wie die Tabelle 3 am Schluß zeigt, unterliegt die Nordseite einer größeren Abtragung als die Westseite; wir wissen, daß die Nordseite am meisten Regen bekommt und sich feuchter erhält als die Westseite. Demnach müßte

[S. 14.

*) Wollny: Forsch. d. Agrik. Physik. — Blanck: Handb. d. Bodenkunde. 1930.

sie eine geringere Abtragungsmenge aufweisen als die trockenere, aber weniger feuchte Westseite, wenn wir den Feuchtigkeitsgrad eines Bodens als Maßstab für die Größe der Abtragung betrachten würden. Dasselbe gilt auch für die Ost- und Südseite. Die Ostseite ist, wie wir wissen, feuchter als die Südseite, unterliegt aber trotzdem einer größeren Abtragung, wie die Messungen ergaben. Diese Ergebnisse scheinen im Widerspruch miteinander und mit dem vorhin Gesagten zu stehen. Mithin muß der Feuchtigkeitszustand eines Bodens vor dem Regen nicht allein für die Größe der Abtragung maßgebend sein. Wir werden es vielmehr noch mit Erscheinungen zu tun haben, die imstande sind, sich gegenseitig in ihrer Wirkung zu unterstützen oder sich aufzuheben.

Wie kommt es, daß die feuchtere Nordseite einer größeren Abtragung unterliegt, als die weniger feuchte Westseite?

Als Grund für die Erscheinung soll zunächst, soweit der Verfasser seinen Beobachtungen entnehmen konnte, der Einfall des Regenwassers angegeben werden. Die Tabelle 3 am Schluß zeigt uns, daß die meisten Niederschläge aus dem Westen bezw. Nordwesten kommen. Das hat zur Folge, daß die Westseite und Nordseite einer besonders starken Benetzung ausgesetzt sein werden, und daß der Boden dieser Flächen, besonders der westlichen, unter einer starken mechanischen Bearbeitung durch das Regenwasser leiden wird. Das heißt, es kommt infolge der Feuchtigkeit der Böden sehr bald zu einer Verdichtung des Bodens, der Bodenoberfläche, zu einer Verschlämmung in hohem Maße, viel stärker als auf der Nordabdachung, die wiederum, weil sie feuchter ist, weniger der Abspülung unterliegt als die Ost- bezw. Südseite. Besonders sind es starke Regenfälle, die die obersten Bodenschichten der Westseiten verdichten, verschlämmen, sie evtl. in eine schlammförmige Masse verwandeln, die den nachfolgenden Wassermassen die Abtragung erheblich erschwert. Nach dem Regen verkrustet die oberste Schicht bei folgender Austrocknung infolge der Volumenverminderung durch den Wasserverlust. Ein neuer Regenfall findet dann den Boden in einem festen, dichten Zustand vor, der die Abtragung erschwert und vermindert.

Dieselbe Erklärung kann aber nicht für die Ost- und Südseite gelten. Daß beide eine größere Abtragungsmenge im Verhältnis zur Nord- und Westfläche haben, ist uns wegen des trockenen Zustandes ihrer Böden nicht sonderbar. Dagegen fällt wieder auf, daß die weniger trockene Ostseite eine größere Abtragung aufweist als die trockenere Südseite. Man könnte vielleicht annehmen, daß die aus Osten kommenden Niederschläge doch eine größere mechanische Wirkung auf den Boden der Ostseite ausüben als auf den der

Südseite. Wie ich aber beobachten konnte, sind die östlichen Regenwinde in unserem Klima recht selten; in der Tabelle 3 sind von 16 Regenfällen nur 2 verzeichnet. Sie können also für die Gesamtsumme der Abtragungsmenge auf der Ostseite nur von ganz geringer Bedeutung sein. Bei allen aufgezeichneten Regenfällen finden wir immer ein einseitiges, deutliches Ueberwiegen der Abtragung auf den Ostflächen, auch bei allen Regenfällen mit Westwinden. Wir werden also nach einer anderen Erklärung suchen müssen.

Sehen wir uns einmal die Abtragungen an, die vom Wind allein verursacht werden. Wir finden, wie die Tabelle 2, Seite 41 zeigt, daß die Südseite und die Westseite am stärksten der Abtragung durch den Wind unterliegen.

Die Voraussetzung für eine Arbeit des Windes muß immer die lockere Beschaffenheit des Bodens oder der Bodenoberfläche sein. Dieser Zustand herrscht, wie wir gesehen haben, bei der Trockenheit der Böden vor; jetzt erst erlangt der Wind die Fähigkeit, die lockeren Bodenteile einer Fläche in Bewegung zu bringen, sie zu verschieben und abzutragen. — Die vom Wind abgetragenen Bodenteilchen der Lehmpyramide waren sehr gering; der große Wassergehalt ließ eine starke Abtragung durch ihn nicht zu. Auf der Sandpyramide tritt die Abtragung deutlich zu Tage.

Wie ich beobachten konnte, gehen fast jedem Regenfall mehr oder weniger starke Winde voraus, die während des Regens an Stärke erheblich nachlassen. Starke Winde sind meist die Vorboten von kommenden Gewittern. Der Wind fegt die kleinen Bestandteile ab, die locker an der Oberfläche sitzen oder aus dem Boden herausragen; diese reißen in ihrer Bewegung wiederum andere mit sich; so wird alles an der Oberfläche sitzende trockene Material vom Winde fortgeschafft, d. h. die Oberfläche wird verhältnismäßig fest erscheinen, feuchtere Schichten lagern besonders obenan. Ein neu einsetzender Regen findet nun ziemlich wenig Abtragungsmaterial vor. Die Tropfen werden infolge der großen Festigkeit des Bodens zerplatzen, die Lockerung des Bodens durch die mechanische Aufschlagskraft der Tropfen wird sehr langsam vor sich gehen. Auf diese Weise tritt eine Verzögerung des Abtragungsvorganges ein gegenüber den Flächen, die vom Winde nicht angegriffen werden. Die Tabelle 2 zeigt uns das ganz deutliche Ueberwiegen der Windabtragung auf der Südseite und die geringere Abtragung auf der Westseite. Die Tabelle ist zwar sehr kurz, und man könnte daher an ihrer Bedeutung zweifeln. Der Verfasser hat die Tätigkeit des Windes im Anfange seiner Messungen sehr bald bemerkt. Er sah

die kleinen Abtragungsmengen sehr oft in den Rinnen mit einem deutlichen Ueberwiegen an der Süd- und Westseite, ohne ihnen aber zunächst eine besondere Beachtung zu schenken und ohne sie zu messen. Nach Köppen*) sind 1876 bis 1887 in Mitteldeutschland von 516 stärkeren Winden: 60 aus östlichen, 456 aus westlichen (S.—NW.) Richtungen aufgetreten, aus SW. = 124, Westen = 191, NW. = 90; die meisten gefährdeten Stellen sind demnach die SW.-, S.- und W.-Seite. Somit scheinen die Beobachtungen des Verfassers gerechtfertigt zu sein. Die genauere Erklärung für alle diese Vorgänge dürfte garnicht so einfach sein, vor allen Dingen würde eine sehr lange Beobachtungszeit notwendig sein.

Daß die Südseite der stärksten Abtragung durch den Wind unterliegt, ist nicht sehr sonderbar, denn sie ist die trockenste Seite und begünstigt diesen Vorgang. — Die Westseite liegt meist der Windrichtung entgegen, auf ihr entfaltet der Wind seine ganze Kraft, indem er sie rasch an der Oberfläche trocknet und sie abträgt. Die Nordseite ist für eine Tätigkeit des Windes zu feucht, er vermag sie auch nicht zu trocknen. Die Ostseite liegt im Windschatten, sie wird deshalb nicht stark angegriffen, jedoch immerhin stärker als die Nordseite. Wir finden sowohl bei südlichen als auch bei westlichen und NW.-Winden die deutlich überwiegenden Abtragungsmengen auf der Süd- und Westseite. Für unsere Betrachtungen in diesem Kapitel wird die Arbeitsleistung des Windes von größter Bedeutung sein. Wir erklären durch ihn die verminderte Abspülung durch den Regen auf der Südseite und Westseite gegenüber den östlichen bezw. nördlichen. So arbeiten bei diesen Vorgängen Wind und Regenwasser entgegen. Der Wind *vor* einem Regen greift den trockenen Boden stark an, festigt oder glättet ihn und verhindert so eine stärkere Abtragung des Regenwassers eines einsetzenden Regenfalles. Der Wind *während* eines Regens dagegen begünstigt die Abtragung auf der der Windrichtung zuliegenden Fläche, wenn auch in einem geringen Maße.

### Wie ging die Abtraguug im allgemeinen vor sich?

Sie vollzog sich immer in der Form der *Flächenspülung*; gleichmäßig wurde jede Seite beregnet und gleichmäßig floß das Wasser auf ihr ab. Zu einer Ausbildung von Regenrillen ist es nie gekommen, sicher reichte die Regenmenge nicht aus oder war das Anlaufsfeld zu klein. Es gelang mir erst nach $^1/_2$ — $^3/_4$-stündiger Beregnung, Regenrillen auf einer Fläche zu erzeugen. Die

*) Köppen: Met. Zt. 1889. VI. S. 114.

Berieselung wurde, wie schon erwähnt, nicht gleichmäßig ausgeführt. Ein weiterer Grund für die Nichtentstehung von Regenrillen dürfte die Gleichmäßigkeit des Bodenmaterials der Pyramiden sein. Regenrillen werden dort wahrscheinlich, wie wir in einem der ersten Kapitel sahen, leicht entstehen, wo das Bodenmaterial sich aus ungleichen Bestandteilen zusammensetzt, d. h. aus Flächen und Schichten, die leichter bezw. schwerer abtragbar sind.

Die scharfen Umrisse der Pyramiden hatten sich am Ende der Messungen sehr verändert. Die Kanten waren abgeschliffen und abgerundet. Die Spitze war ungefähr 8—10 cm abgetragen und vollkommen abgerundet. Die stärkste Veränderung wies die SO.-Kante auf. An den Flächen waren die Unterschiede der Abtragungsmengen äußerlich sichtbar (Fig. 7 und 8).

Die Flächen erlitten aber keineswegs eine gleichmäßige Abtragung. Im Laufe der Zeit bildeten sich auf ihnen bestimmte Einbuchtungen heraus, die jede Fläche in einer bestimmten Höhe überzogen.

Fig. 7 Ursprüngliche Form.

Fig. 8. Veränderte Form mit abgetragener Spitze und Einbuchtungen.

Mit welcher Erscheinung wir es hier zu tun haben, ist sehr schwer festzustellen. Wahrscheinlich sind diese Einbuchtungen eine Bildung des abfließenden Wassers, die sehr langsam vor sich geht. Der Wind scheint bei ihrer Entstehung keine Rolle zu spielen. Möglicherweise könnten wir folgende Ursache als Bildungsgrund annehmen: die größten Feuchtigkeitsmengen oder die größte Wassermenge bei einer schräg gestellten Bodenfläche wie die unserer Pyramiden werden sich in den untersten Partien ansammeln. Wollny*) stellt durch Messungen fest, daß die tiefer liegenden Teile der Böden in allen Fällen mehr Wasser enthalten als die höher gelegenen; es erklärt sich das durch das Absickern des Wassers. Wie wir wissen, setzt ein feuchter Boden der Abtragung durch fließendes Wasser einen größeren Widerstand entgegen. Das Regenwasser läuft mit Bodenteilchen beladen den Hang hinab. Seine Geschwindigkeit nimmt infolge des Gefälles und der größeren

*) Ramann: Bodenkunde S. 365.

Wassermassen zu, es steigert sich die abtragende Kraft des Wassers. „Die an einem Abhang herabspülende Regenwasserschicht wird nach unten immer mächtiger, daher, da die Kraft außer vom Gefälle von der Wassermasse abhängt, kann sie unten schneller abflachen als oben." *) Nun in dieser größeren Geschwindigkeit wird plötzlich eine Schicht oder ein Teil einer Fläche erreicht, die der mechanischen Arbeit des Wassers größere Widerstände entgegensetzt. Es wird sich bei Beginn der Feuchtigkeitszone eine Stauung der Wassermenge bilden, die eine kleine runde Ausnagung durch eine evtl. stattfindende Kreis- oder Wellenbewegung des Wassers zur Folge haben wird. (Vergl. Fig. 9 und 10.) Ist nun die Anfangsform durch einen kräftigen Regenfall entstanden, so wird sie von weiteren Regenfällen mehr ausgearbeitet, vertieft und vergrößert, die Rundung wird allmählich gleichmäßig.

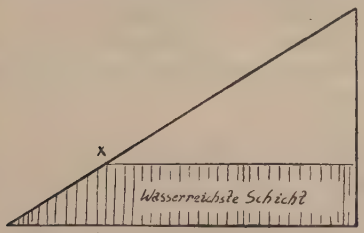


Fig. 9. Wasserverteilung in der Pyramide.

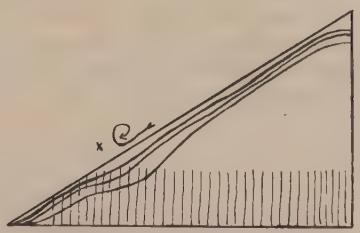


Fig. 10. Entstehung der Einbuchtung.

Es herrscht hier sicher dasselbe Prinzip vor, was für die Entstehung der Regenrillen Geltung hat; Aenderungen, Ungleichmäßigkeit in der Bodenform, Art und Feuchtigkeit bewirken ungleichmäßige Aenderungen in der Abflußform.

Diese Einbuchtung wird für die unter ihr liegenden Flächenteile bei Regenfällen einen gewissen Schutz ausüben. Die Kraft des Regenwassers wird vermindert, die unterhalb der Einbuchtung liegenden Flächenstücke werden vor einer starken Abtragung geschützt, langsam überspült, wobei es zu einer Ablagerung einiger mitgeführten Bodenpartikel kommen wird. Diese werden sich evtl. auch in der Einbuchtung selbst ablagern. Eine lange Dauer wird diese Bildung auf den Flächen nicht haben, das Regenwasser erweitert sie, der Wind verweht sie bei größerer Austrocknung. Es ist auch nicht ganz ausgeschossen, daß die Einbuchtung auf der Pyramidenfläche eine Wanderung von unten nach oben vollführt.

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd. 2. Heft, S. 33/35 1924.

## Endformen.

Wir wollen unsere Betrachtungen über die entstandenen und entstehenden Formen unserer Pyramide durch den Einfluß des Regens weiter fortsetzen. Wir wollen die Endformen betrachten, die wir erhalten.

Eine Erniedrigung der Flächen und der gesamten Pyramide muß auf alle Fälle eintreten, gleichzeitig die Entstehung von runden Formen. „Wenn wir also als Ausgang der Entwicklung einen gleichmäßig geböschten Abhang annehmen (immer gleichen Gesteinswiderstand vorausgesetzt), so wird er mit dem Fortschreiten der Abspülung flacher, aber nicht gleichmäßig, sondern in Form einer nach unten flacheren Kurve. Die obere Kante des Abhanges wird dann immer mehr durch Abwitterung und Gekriech gerundet." *) So läßt sich nach Philippson eine Entwickelungsreihe der Abspülungsform aufstellen (Fig. 11) von einem gegebenen ungleichmäßigen mehr oder weniger steilen Abhang, mit Halden in den Gefällsknicken, zu immer flacheren Formen ohne Halden, aber immer mit deutlichem Ansteigen gegen oben. **)

Fig. 11 (nach Philippson).

Auf den Pyramiden erhalten wir folgende Formen: einen konvex gekrümmten Buckel, steil abfallend (Fig. 12).

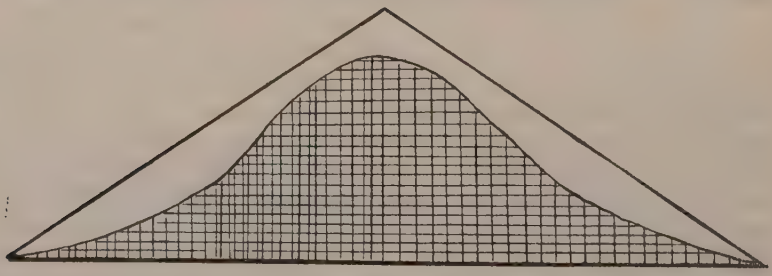

Fig. 12.

*) Philippson: II., 1924, Seite 34.
**) ebenda: 1924. Seite 34.

Wie entwickeln sich nun die weiteren Formen? Wir könnten theoretisch zwei verschiedene Bildungen der Endformen erhalten:

eine konkave Form,

eine konvexe Form, die aber leicht nach der Skizze von Philippson (Fig. 11) in eine konkave Form umgewandelt werden könnte.

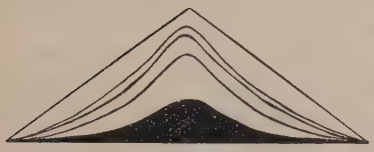

Fig. 13.

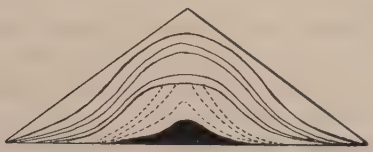

Fig. 14.

Nach der Fig. 12 erhaltenen Form dürften wir in der Weiterbildung keine konkave Form erhalten. Die Stärke der Abtragung an der Spitze und das Erscheinen der Einbuchtung lassen vielmehr auf konvexe Bildungs- und Endformen schließen, die in den letzten Stadien ihrer Abtragung evtl. noch in eine konkave Form umgewandelt werden könnten.

Wir werden folgende Endformen erhalten: eine Buckelform, deren Wände verhältnismäßig steil abfallen. Die Ost- und Südseite werden infolge erhöhter Abtragung durch das Regenwasser eine stärkere Neigung aufweisen.

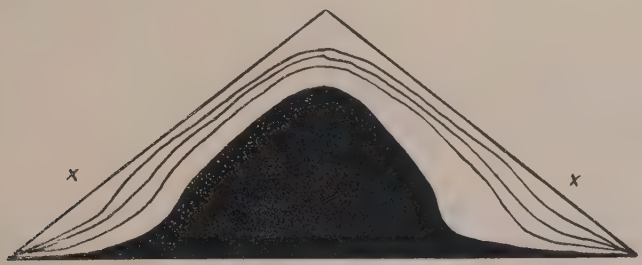


Fig. 15.

Die größte Kraft des abfließenden Regenwassers wird mit der mit × bezeichneten Zone erreicht, hier erfolgt die stärkste Abtragung. Danach läßt die Geschwindigkeit des Wassers nach. Es überspült den feuchteren, unteren Teil der Fläche, ohne ihm allzugroßen

Schaden zuzufügen. „Auf alle Fälle bewirkt die Abspülung eine Erniedrigung und daher fortschreitende Abflachung aller von ihr betroffenen, wenn auch flach geneigten Böschungen." *)

Zum Schluß wollen wir mit ganz kurzen Worten die Tabelle 3 am Ende dieser Arbeit betrachten. Die ersten angeführten Regenfälle hatten für die äußere Gestaltung des Bodens gar keinen Einfluß; zu einem Abfluß des Regenwassers ist es nicht gekommen, da das Wasser infolge einer großen Trockenperiode von dem wasserdurstigen Boden sofort aufgenommen wurde.

Deutlich zeigt sich der Gegensatz einer größeren Abtragung bei trockenem und bei feuchtem Zustand des Bodens. Vergl. besonders: 18. 9, und 25. 10. Ferner zeigt sich deutlich der Gegensatz von starken Regenfällen (Gewitterregen) und Landregen, vergl. u. a. 27. 9. und 2. 10., desgleichen der deutliche Einfluß starker Winde, die den Regen begleiten, in einer erhöhten Abtragung der Regenwindseite: am 2. 10. (W.-Seite) und 18. 10. (W.-Seite). —

## 4. Der Einfluß der Bodenbedeckung.

Wir haben bereits durch Messungen nachgewiesen, daß eine Pflanzendecke die Abspülung durch das Regenwasser in erheblichem Maße vermindert. Wir fanden ein Verhältnis von 1 : 20, d. h. bei einer vegetationslosen Fläche werden fast 20 mal so viel Bodenpartikel abgetragen als auf einer gleich großen, die mit Gras bedeckt war. Das sind recht große Differenzen; in der Natur sind sie noch viel größer. Wir wollen unsere Betrachtungen einteilen in die Bodenbedeckung durch: 1. Feld, 2. Wiese, 3. Wald. Von einer regionalen Betrachtung der Bodenbedeckung soll in dieser Arbeit abgesehen werden. Sie ist von E. Bach **) ausführlich behandelt worden.

### Feld.

Wir haben die Wirkungen des Regens auf vegetationslosem Feld und Flächen schon kennen gelernt und gesehen, in welch hohem Maße sie der mechanischen Abspülung des Regens unterworfen sind. Spitze Formen werden gerundet, das Material wird teils durch flächenhaftes, teils durch rinnenhaftes Abfließen in tiefere Lagen

*) Philippson: Allg. Geogr. II. 2. S. 34. 1924.
**) E. Bach: Morph. Bedeut. d. Regens. 1915.

befördert und hier abgelagert. Wir machen leicht die Beobachtung, wie arm an feinen Bodenpartikeln die obersten Partien der Hügel usw. sind. „Auf nacktem Boden ist die Abspülung sehr stark, aber auch auf geeigneten Ackerfeldern, sodaß man diese durch Stufenbau schützen muß." *) Die Einwirkungen des Regens auf eine lebende Pflanzendecke sind dagegen viel geringer, z. T. werden sie ganz ausgeschlossen. Sie werden umso geringer sein, je dichter die Pflanzen stehen, je rascher sie sich entwickeln und je langlebiger sie sind.

Welchen schützenden Einfluß übt nun die Pflanzendecke bei einem Regenfall auf den Boden aus?

1. Sie schützt zunächst einen Teil des Bodens vor dem direkten Einschlagen der Regentropfen und der mechanischen Lockerung durch ihren eigenen Körper. Zumindestens verringern sie die Aufschlagskraft, indem sie die Regentropfen auffangen. Dieser Einfluß der Pflanzen auf die Wasserzufuhr, d. h. die Wassermenge, die von den atmosphärischen Niederschlägen die oberste Bodenoberfläche erreicht, ist recht bedeutend. Natürlich wird jede Pflanzenart je nach der Größe ihres Habitus wirken. Wollny **) gibt an, daß von den gefallenen Regen der Bodenoberfläche zugeführt werden bei Bedeckung durch

| Mais | Soja-Bohnen | Hafer | Wicken | Bohnen und Lupinen. |
|---|---|---|---|---|
| 57 % | 60 % | 78 % | 79 % | 75 % . 58 %. |

Wir dürfen also annehmen, daß durchschnittlich fast ein Drittel der sommerlichen Niederschläge an den Pflanzen hängen bleibt und verdunstet, ohne daß es dem Boden zugute kommt. Abweichungen werden eintreten, je reichlicher und dauernder die Regen und je größer die Tropfen sind. Kleine Niederschläge, die in sehr kleinen Tropfen fallen, gelangen kaum zum Boden. Auf diese Weise wird der Boden vor der mechanischen Auflockerung durch den Regen geschützt. Im jugendlichen Zustande, solange die oberirdischen Organe nicht vollkommen sind, und zwischen den einzelnen Pflanzen viele Lücken liegen, ist der Wasserverlust durch die Pflanzendecke ein verhältnismäßig sehr geringer, während üppig entwickelte Gewächse bei dichtem Stande schwache Niederschläge fast gänzlich zurückhalten.

2. Nach Ramann ***) sind die Oberflächen bewachsener Böden und die unmittelbar benachbarten Lagen feuchter als die freiliegenden Böden. Er führt dies zurück auf die durch die Pflanzendecke gehemmte Luftbewegung, die den Boden austrocknen könnte,

*) Philippson: II./2., Seite 35. 1924.
**) Wollny: Forschungen d. Agrik. Physik. Heft 13 Seite 331. 1895.
***) Ramann: Bodenkunde 1905 Seite 327.

auf die niedrige Temperatur und damit verbundene verminderte Verdunstung, da ja die Sonnenstrahlung nicht zum Boden gelangen kann. Jene feuchte Oberfläche wirkt für die Abspülung, die bei starken Regengüssen noch in Frage kommen könnte, im Gegensatz zu den trockenen Böden, wie wir im vorigen Kapitel sahen, hemmend.

3. Weiter wird die Gefahr einer Abspülung durch den Regen vermindert durch den Lockerheitsgrad des Bodens, der das Regenwasser leicht in ihn eindringen läßt. Wollny*) kommt zu dem Schluß, daß der Lockerheitszustand des Bodens durch die Vegetation im höheren Grade erhalten wird, also auf brach liegendem Felde.

4. Die von den lebenden Pflanzenwurzeln durchzogenen Bodenschichten sind immer wasserärmer als die obersten unbewachsenen Schichten. Die Pflanzen verbrauchen das Wasser beim Wachstum zum Aufbau neuer Organe und eine gewöhnlich noch viel größere Wassermenge als Transpirationswasser infolge der Verdunstung ihrer oberirdischen Organe, zumal der flachen, grünen Blätter. Die Pflanzen erhalten ihr Verbrauchswasser in der Regel durch die Wurzeln zugeführt; es besteht aber auch kein Zweifel, daß die Pflanzen unter gewissen Umständen imstande sind, Regentropfen mit ihren oberirdischen Organen (Blätter, Haare usw.) aufzunehmen. Wenn dies auch in unserer einheimischen Flora nicht beobachtet worden ist, so können wir wohl annehmen, daß dies in den Wüsten- und Steppenvegetationen stattfindet.

Die Wurzeln zeigen ihrer Aufgabe entsprechende Organisationen; sie breiten sich flach aus und dringen mit ungeheuerer Länge tief in den Boden ein, dem sie das Wasser entnehmen. Natürlich wird bei diesen Vorgängen die Beschaffenheit des Bodens wieder eine Rolle spielen; längst nicht alles Wasser, das dem Boden zugeführt wird, wird an die Wurzeln abgegeben. Je stärker das Wasseranziehungs- und Absortionsvermögen eines Bodens für Wasser ist, eine um so kleinere Wassermenge steht den Wurzeln zur Verfügung. Der Rest verbleibt dem Boden, an die Erdpartikel hygroskopisch gebunden. Durch den großen Wasserverbrauch weisen die tiefer liegenden Schichten immer ein Bedürfnis nach Wasser auf. Das Regenwasser wird der Oberfläche entzogen und steigt abwärts.

So können wir wohl folgern, daß es auf einem mit dichtem Pflanzenwuchs bedeckten Felde kaum zu einer schichtflutartigen flächenhaften Ueberspülung kommen wird, da die Pflanzen zu große Hindernisse darstellen; auch die Ausbildung von Regenrillen wird bei normalen Regenfällen meist unterbleiben.

*) Wollny: Forsch. d. Agrik. Physik, 12 Seite 36.

## Die Rasendecke.

Den Uebergang von der vegetationsarmen Bodendecke zur geschlossenen wird bei uns in der gemäßigten Zone von der Rasendecke gebildet. Wir wollen ihre Bedeutung für die Abtragung durch den Regen kurz betrachten. Vor allen Dingen „ist hier die Arbeit der Bodentiere eine ganz beträchtliche". *) Es werden von ihnen Unebenheiten geschaffen, auf die der Regen dieselbe Wirkung ausübt wie auf vegetationslosem Felde. Bei der ungeheuren Blättermenge ist beobachtet worden **) daß von den Blättern einer Rasendecke durchschnittlich nur 2,6 % des oberflächlich abfließenden Wassers zurückgehalten wird. Es dringt also hier verhältnismäßig sehr viel Wasser in die Wurzel- bezw. Verwitterungsschicht einer Rasendecke ein. Eine direkte mechanische abtragende Wirkung des Regens wird ganz ausgeschlossen, es sei denn, daß durch Bodenbewegungen Risse in der Bodendecke entstehen, die dem Regenwasser Gelegenheit zum rinnenhaften Abfluß und zu erodierender Tätigkeit geben.

Besondere Bedeutung hat für eine Rasendecke die indirekte mechanische Regenwirkung, die ungeheure Durchfeuchtung und damit verbundene Bodenbewegung. „Jedenfalls ist die Wiese ein großer Schutz gegen die Abspülung, die hier unter der Laub- und Grasnarbe sich langsam vollziehen kann. Es kommt dabei nicht allein in Betracht, daß die Pflanzen den Boden festhalten, sondern auch daß sie das Wasser zurückhalten und nur langsam abfließen lassen." ***)

## Der Wald.

Nicht so einfach gestalten sich die Verhältnisse bei der Betrachtung des Waldes, wie überhaupt der Einfluß der Vegetation sehr schwer zu ermitteln ist. Nach W. Ule †) stellt sie eine Behinderung des direkten Abflusses des Regenwassers dar. „Diese Wirkung üben ebenso niedrige Kräuter, Gräser und Bäume aus. — Im allgemeinen nimmt der hemmende Einfluß mit der Größe und zugleich mit der Dichte des Pflanzenkleides zu. Am wenigsten kommt wohl das Regenwasser im Nadelholzwald zum Abfluß. Dort gelangt selbst bei starken Regen zuweilen das Wasser nicht bis auf

*) E. Bach: Seite 51.
**) Hann: Handb. d. Klimatolog. 1. Bd. S. 191 Stuttg. 1908.
***) Philippson: Allgem. Geogr. 2./2. Seite 35. 1924.
†) W. Ule: Theoret. Betracht. über den Abfluß des Regenwassers. Z. f. Gewässerkunde 7 1906.

den Boden." — Die Unterschiede werden je nach den einzelnen Bedingungen, die vorherrschen, stark variieren. Die innerhalb des Waldes niedergehenden Regenmengen sind im Vergleich zu dem auf vegetationslosem Gebiet niederfallenden nach Baumart, Dichte des Standes, Alter, Kronenentwicklung usw. verschieden. Verschiedenartig wirken ferner die Benetzung, die Regenintensität und Regenmenge.

Im allgemeinen können wir für den Laubwald wie für den Nadelwald sagen: „Je weniger Niederschläge vom Kronendach eines Waldes zurückgehalten werden, je schwächer die Belaubung und Ausbildung der Baumkronen ist, je mehr Lücken in den Kronen und in den Beständen sich vorfinden, je mangelhafter der Kronenschluß ist, je weniger Bäume auf einer bestimmten Bodenfläche stehen, und je stärker und reichlicher die Niederschläge sind, desto mehr Wasser wird dem Waldboden zugeführt und umso stärker ist die Durchfeuchtung desselben." *)

Die Beobachtungen von Ebermayer haben ergeben, daß die durch die Kronen dringenden und vom Schaft abfließenden Wassermengen bei allen Laubbäumen beträchtlich größer sind, als bei Nadelbäumen **), unter denen die Fichten und die gutgeschlossenen Kiefern am ungünstigsten wirken, während die Lärchen den Uebergang zu den Laubhölzern bilden. Nach Schätzung des Verfassers werden ungefähr ein Viertel der fallenden Niederschläge von dem Kronendach zurückgehalten. Die Blätter der Laubbäume bieten dem Regenabfluß weniger Hindernisse als die immergrünen Nadelbäume mit ihren zahlreichen kleinen Nadeln, an denen unzählige Regentropfen hängen bleiben. Die Blätter der Laubbäume sind biegsam, sie werden durch die Belastung der Regentropfen leicht aus dem Gleichgewicht gebracht, wobei die Tropfen verloren gehen bezw. auf die tieferen Blätter usw. niederfallen. Oder sie fließen auf dem Blatt zusammen und gelangen über Zweige und Aeste zum Stamm und dort den Schaft hinab. Im Winter wirkt sich das günstige Verhalten der Laubbäume am besten aus. Ihre Kronen sind dann im blattlosen Zustand, und so zu einer Ansammlung von Wasser nicht geeignet. Das Verhalten der verschiedenen Laubbäume zu den Niederschlägen wird wiederum stark variieren je nach der Art ihrer Belaubung und der Dichte ihres Standes. Die stark belaubten Buchen und alle anderen Schatten ertragenden Bäume lassen nach Ebermayer ***) noch weniger Wasser auf den Boden

*) E. Ebermayer: Einfluß der Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit usw. 1900. Seite 3.

**) ebenda: Seite 5. ***) ebenda: Seite 4.

gelangen als die schwächer belaubten, lichtbedürftigen Holzgewächse wie Birken, Akazien, Eichen usw., die sich auch im höheren Alter viel freier stellen als die erstgenannten Baumarten.

Der gesamte Wasserverlust des Bodens durch das Kronendach beträgt, wie Ebermayer es berechnet hat, im Buchenwalde mittleren Alters durchschnittlich ca. 20 % der im Freien fallenden Niederschläge, je nach der Kronenentwicklung und Regenstärke. Mit abnehmendem Alter und schwächerer Kronenentwicklung nimmt in Buchenbeständen die zu Boden gelangende Niederschlagsmenge zu.

Wie sind die Verhältnisse bei den Nadelbäumen? Bei lichtem Schluß werden im Jahresmittel ca. 30 %, bei dichtem Stande 40—45 % der fallenden Niederschläge vom Kronendach zurückgehalten. Kieferwälder halten etwa ein Drittel der jährlichen Niederschlagsmenge auf diese Weise zurück.**)

Eine gewisse Regenmenge wird auch am Schaft der Bäume ablaufen. Bei den Nadelbäumen ist diese Menge sehr gering. Sie beträgt nach Geiger***) durchschnittlich 50 %. Die rissige, rauhe Rinde erschwert das Abfließen, während bei den Laubhölzern, z. B. bei der Buche und Birke infolge ihrer glatten Rinde das Gegenteil erreicht wird. Die Mengen, die hier so abgeführt werden, sind verhältnismäßig groß.

Wir haben bis jetzt festgestellt, daß der Laubwald für die Durchlässigkeit des Regens günstiger ist als der Nadelwald. Natürlich hat die Menge der Niederschläge und die Intensität auf die im Walde fallenden Regenmengen einen großen Einfluß. Schwache Regen gehen dem Waldboden vollständig verloren; sie werden ganz zurückgehalten. Mit der Stärke der Niederschläge steigert sich die durch die Baumkronen dringende Wassermenge, wie die Untersuchung von Hoppes und Bühler zeigen.†) Die prozentuale Menge des festgehaltenen Regens fällt mit der Stärke der Niederschläge, sodaß von schwachen Regen kaum Wasser den Boden erreicht, während bei starken Regen die Unterschiede gering werden.

Im Durchschnitt wurden von den Niederschlägen in den Kronen festgehalten:

| | bei Regen bis 10 mm | 10—20 mm |
|---|---|---|
| 60jährige Fichten | 63 % | 39 % |
| 65jährige Kiefern | 42 % | 24 % |
| 88jährige Buchen | 30 % | 17 % |

*) E. Ebermayer: Einfluß der Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit usw. 1900. Seite 5. **) ebenda: Seite 5.

***) R. Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 1927. S. 167.

†) Hoppes u. Bühler: Mitt. a. d. forstl. Vers.-Wes. Oesterr. 1896. 21. Heft.

Ney*) nimmt im Durchschnitt folgende Zahlen an:

| | a. d. Kronen bleiben, | am Stamm ablaufen, | verdunsten: | f. 1 Jahr verdunsten rund: |
|---|---|---|---|---|
| Buchen | 35,4 % | 15,4 % | 20 % | 15 % |
| Kiefer | 24,5 % | 0,7 % | 24 % | 20 % |
| Fichte | 43,4 % | 2,3 % | 41 % | 33,5 % |

Die Verluste an Wasser im Walde durch die Wirkung der Baumkronen sind daher viel größer als der geringe Gewinn durch Steigerung der Niederschläge. Der Teil des Regenwassers, der zum Boden gelangt, wird nach Geiger**) innerhalb des Waldes ungleichmäßig verteilt. Er ist am geringsten unmittelbar an den Stämmen und wächst, je mehr man sich der Baumtraufe nähert. Dies zeigt folgende Tabelle für den gleichen Waldbestand und für alle Regenfälle, ungeachtet ihrer Stärke; sie gibt die Niederschläge in der genannten Entfernung vom Stamme an in Prozenten der auf den Wald fallenden Regenmenge:

| Entfernung vom Stamm in m: | % |
|---|---|
| 0 bis 1/2 m | 55 |
| 1/2 bis 1 m | 60 |
| 1 bis 1 1/2 m | 63 |
| über 1 1/2 m | 66 |
| in Lückennähe | 76 |

Welchen Einfluß hat der Wald auf die Niederschläge? Erhöht er die Regenmenge? „Sein Einfluß auf die Niederschläge, und zwar diese verstärkend, scheint in unseren Breiten sehr gering, in den Tropen beträchtlicher zu sein, jedoch ist es noch sehr strittig." ***) Daß oft andere atmosphärische Zustände über den Wäldern herrschen, können wir häufig beobachten, indem wir über dichten Waldungen häufigere Nebel und Wolken wahrnehmen. Man könnte daraus schließen, daß diese abweichenden atmosphärischen Zustände auch eine reichere Niederschlagsbildung, was auch sicher ist, bedingen. Sehr lange hat über diese Dinge Streit geherrscht. Von einzelnen Forschern wurde der Entwaldung eine regenvermindernde Wirkung zugeschrieben; von anderen wurde das bestritten.

Schubert†) erklärt sich diese Vorgänge am einfachsten; er nimmt den Wald als ein mechanisches Hindernis der Winde an, genau wie eine jede Erhebung oder ein Gebirge. Dadurch wird ein Ansteigen der Luftströmungen veranlaßt, was dann Abkühlung

*) Ney: Forstw. Zentralbl. 1901. Seite 448.
**) Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht. S. 167.
***) Philippson: Allgem. Geogr. 1924. 1. Bd. S. 181.
†) Schubert: Wald und Niederschlag in Schlesien. 1904.

und eine Annäherung an den Taupunkt bezw. an die Kondensation mit sich bringt. Die Wirkung des Waldes ist etwa von gleicher Größe wie höhere Lage des Geländes in etwa doppelter Höhe der Bäume. — Nun, die Steigung des Regenfalles dürfte demnach eine sehr geringe sein, denn ansteigende Luft kühlt sich um 1° auf 100 m ab. Nicht jedes Ansteigen der Luft wird eine Kondensation zur Folge haben, sondern nur dann, wenn es bis zum Taupunkt, zur Sättigung der Luft fortgesetzt wird. Das hängt wiederum neben der Höhe des Ansteigens auch von der relativen Feuchtigkeit ab, die die Luft bei Beginn des Ansteigens gehabt hat. Relativ feuchte Luft bedarf also nur eines geringen Ansteigens zur Wasserabgabe, während trockene Luft bis zu diesem Ziele sehr hoch steigen muß.

Niederschlag im Walde entsteht aber auch auf eine andere Weise. Nach Geiger*) wird Luft, die Wasser in Tropfenform mit sich führt (Nebel), durch den Wald mit seinen vielen Zweigen und Blättern zum Absetzen der Tropfen veranlaßt. R. Süring**) nennt diesen Niederschlag, der dem Waldklima zu eigen ist, den „horizontalen Niederschlag."

Descombes***) behauptet, daß er in Ländern mit mehr als 25% Bewaldung den vertikalen Niederschlag an Größe übertreffe.

Für unsere Betrachtungen ist es nun von Interesse zu wissen, wie die Bodendecke des Waldes beschaffen ist, und welche Wirkung das Regenwasser auf sie ausübt. „Die Eigenschaften des normalen, gesunden Waldbodens unterscheiden sich vom Freilandboden namentlich durch geringere Erwärmung und durch höheren Wassergehalt der obersten Bodenschicht. Charakteristisch sind die geringen Schwankungen, welche ebensowohl Temperatur wie Feuchtigkeit im Waldboden erleiden; hierdurch werden für niedere Bodentiere die für das Tierleben günstigen, gleichmäßigen Bedingungen der Entwicklung geschaffen." †)

Die oberste Schicht des Laubwaldbodens bilden frischgefallene Blätter und Zweige. Sie hebt sich scharf von den zersetzten unteren Lagen ab. Wegen des Lichtmangels im sommengrünen Laubwald kann sich nach Pilger††) eine reiche Frühlingsflora entwickeln; sie stirbt meist nach der Fruchtzeit ab, wenigstens in ihren oberirdischen Teilen. Das gilt hauptsächlich für den Buchenwald.

---

*) Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Seite 168.
**) Süring: (F. Lincke Niederschlagsmess. unter Bäumen, Met. Z. 1916).
***) Descombes: Der Einfluß d. Bewaldg. a. d. Niederschläge. Ref. Zentralbl. f. d. ges. Forstwesen. 1921.
†) Ramann: Bodenkunde. 1905. Seite 333.
††) Pilger: Pflanzengeogr. 1913. Seite 208.

Im allgemeinen ist der Eichenwald lichter als der Buchenwald und läßt daher eine reichere, krautige Bodenvegetation, vor allem Farne aufkommen. Die übrigen Schichten des Laubwaldbodens sind von den oberen scharf getrennt. Sie entstehen nach Ebermayer*) durch Verwesung der Abfälle des Waldes als lockerer, leicht zersetzbarer Humus, der unter der Mitwirkung der Baumwurzeln dem Boden eine krümelige, lockere Struktur erteilt, wodurch das Eindringen von Luft, Wasser und Wärme begünstigt und die Verdunstung der Bodenfeuchtigkeit aus tieferen Schichten sehr erschwert wird. Zur Auflockerung trägt auch die tiefe Durchwurzelung durch die Bäume bei. In der Wurzelschicht des Laubwaldbodens wird „eine reiche Entwicklung von Tieren, die den Boden weiterhin durch ihre Tätigkeit locker erhalten", ermöglicht.**) Der Boden des Nadelwaldes besteht in seiner oberen Schicht aus einer Streudecke, die dicht geschlossen ist, dichter als die des Laubwaldes. Die Durchlüftung ist infolgedessen eine geringere. Diese oberste Schicht ist in der Lage, sehr viel Wasser aufzunehmen und den größten Teil davon dann langsam an den Boden abzugeben. In der Regel entsteht nach Ebermayer***) aus dicht zusammenhängender Streudecke durch Vermoderung ein dichter, schwer zersetzbarer saurer Rohhumus. Gewöhnlich werden diese Böden durch das Vorkommen von Heidel- und Preißelbeersträuchern, von Heidekraut und Moosen charakterisiert.

Infolge der Bodenbedeckung mit Laub, Nadeln und Kräutern ist bei beiden Waldarten dem Regentropfen eine Möglichkeit zur mechanischen Auflockerung des Bodens nicht gegeben. 1. ist die Druckwirkung des aufschlagenden Regentropfens auf den Boden zu gering, da der Tropfen meist aus ganz geringer Höhe von den Bäumen herabfällt; 2. gibt die obere Bodendecke infolge ihrer Elastizität der Schlagwirkung nach; 3. fangen die Pflanzen, die den Boden bedecken, den Regentropfen auf, genau wie wir es bei der Feld- und Grasvegetation gesehen haben; 4. ist das Bodengefüge für eine Lockerung durch den Regen zu fest und zu feucht. Der niederfallenden Regenmenge wird also jede mechanische Wirkungskraft genommen. Das geschlossene Kronendach, die Beschattung des Bodens, die Streu-, Moos- und Humusdecke, die zahlreichen Baumstämme, das weit ausgedehnte und verzweigte Wurzelgeflecht, alles wirkt nach Ebermayer †) zusammen, um dem Walde an allen Gebirgskämmen und stärker geneigten Abhängen die Eigen-

*) Ebermayer: Einfl. d. Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit usw. S. 22
**) Pilger: Pflanzengeogr. S. 207.
***) Ebermayer: S. 23. †) ebenda: S. 41.

schaft eines Schutzwaldes zu verleihen. Durch das Kronendach wird die mechanische Kraft des Regenfalles abgeschwächt, ein beträchtlicher Teil zurückgehalten, wie wir gesehen haben. — Der Boden ist der direkten Einwirkung der Sonnenstrahlen nicht ausgesetzt und so vor großer Verdunstung und Austrocknung geschützt, die nächtliche Wärmeausstrahlung wird vermindert. Die starke Beschattung des Bodens durch die Bäume und die durch sie gehemmten Luftbewegungen erschweren ein Austrocknen der Böden, wodurch die Gefahr einer Abspülung und mechanischen Auflockerung durch den Regen herabgesetzt wird. Wie wir wissen, sind feuchte Böden schwerer abtragbar.

Die verschiedenen Bodendecken des Waldes saugen schwammartig den größten Teil des Regenwassers in sich auf. Frische, unzersetzte Streu läßt das Wasser leicht durchsickern, erhält den darunterliegenden Mineralboden feucht; je mehr die Verwesung eines Bodes fortschreitet, um so größer wird sein Absorptionsvermögen. Eine Moosdecke hält wesentlich mehr Wasser zurück als eine Laub- und Nadeldecke von derselben Mächtigkeit. Stärkere Regen vermögen die Streudecke stärker zu durchdringen als schwächere. *) Das mit Erdteilchen innig verwachsene, nach allen Seiten weit verbreitete Wurzelwerk befördert den Lockerheitsgrad für die Wasseraufnahme, erschwert das Abschwemmen des Erdreiches und die Bildung von Regenrillen und Wildbächen. Im übrigen sind unsere gewöhnlichen, sanften Regenfälle nicht stark und land genug, um irgendwelche Regenrillen hervorzubringen. Die Widerstände der Vegetation und der Bodendecke sind zu groß. „Eine dichte Pflanzendecke, wie der Wald, schließt aber keineswegs jede Abspülung aus, wie schon die Beobachtung lehrt, daß aus dem Walde kommende Bäche nach starkem Regen getrübt sind, (wenn auch lange nicht so wie solche in waldfreiem Gelände)." **)

In den Ebenen ist die Verwertung des Niederschlags durch den Waldboden sehr groß, an den Gebirgshängen wegen des teilweise oberflächlichen Abflusses des Wassers ist dies nicht der Fall. Je steiler die Hänge der Gebirge sind, um so weniger werden sie imstande sein, schnell zur Erde fallende große Regenmassen festzuhalten und in sich aufzunehmen. Länger anhaltende Regen, Gewitterregen, Wolkenbrüche und plötzliche Schneeschmelze usw. sind in den Höhenlagen dadurch sehr schädlich, daß in der Richtung des stärksten Gefälles durch den raschen Abfluß des Wassers auf allen nicht bewaldeten steilen Abhängen die fruchtbare Boden-

*) W. Rieger: Mitt. a. d. forstl. Versuchswes. Oesterreichs. 2. Band, 2. Heft, Seite 201.

**) Philippson: Allgem. Geogr. II. Band, 2. Heft, S. 34. 1924.

krume allmählich abgeschwemmt wird, Rinnsal an Rinnsal, Gräben und Hohlwege sich bilden. Durch sie stürzen die Wassermassen mit wechselnder Geschwindigkeit in die Täler, eine Masse von Gesteinstrümmern, Schutt, Sand, Lehm usw. mit sich führend. *)

Nur im Walde selbst wird diese Erscheinung auf ein Minimum herabgesetzt werden. Heftige Wolkenbrüche vermögen in seltenen Fällen ähnlich zerstörend zu wirken, ihre Wirkungen nehmen aber nie solch gewaltige Formen an, wie wir sie auf vegetationslosen Hängen kennen gelernt haben. Die Möglichkeit einer flächenhaften Abspülung oder überhaupt einer Abtragung durch den Regen ist bei unseren normalen Land- und Gewitterregen fast ausgeschlossen. — „Jedenfalls ist der Wald, im geringeren Maße die Wiese, ein großer Schutz gegen die Abspülung, die hier unter der Laub- und Grasnarbe sich langsam vollziehen kann." **) So hat die Entwaldung einer Fläche immer eine Erhöhung der Abspülung zur Folge. „Bei Klimawechsel von einem Waldklima, in dem sich ein tiefgründiger Boden gebildet hat, zu einem Trockenklima tritt zunächst eine gewaltige Abspülung und Anhäufung von Sedimentmassen in den Tälern und Niederungen ein. Klima und Vegetation bedingen also eine regionale Anordnung der Denudationsformen." ***) Wir wollen von einer klimaregionalen Betrachtung der Abspülungsformen absehen. E. Bach †) hat sie ausführlich bereits behandelt.

## 5. Denudationsformen.

Unter Denudation wollen wir auch die Abspülungserscheinungen der Erdoberfläche durch abfließendes Regenwasser verstehen. Es soll die mechanische und chemische Regenwirkung kurz betrachtet werden, wie sie sich an den Landformen zeigt.

„Gewaltig sind in morphologischer Beziehung die Wirkungen der Abspülung. Ein bedeutungsvoller Faktor ist sie zunächst in der Ausgestaltung der Gipfelformen." ††) An jedem Punkte der Erdoberfläche arbeitet, wie wir wissen, unablässig die Verwitterung. In unserem Klima sind es die Feuchtigkeits- und Wärmeschwankungen,

*) Ebermayer: Einfluß d. Wälder a. d. Bodenfeuchtigkeit usw. 1900. Seite 39.
**) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd., 2. Heft, Seite 34. 1924.
***) Ebenda: Seite 34.
†) E. Bach: Die morph. Bedeutung des Regens. 1915.
††) E. Brückner: Die feste Erdrinde und ihre Formen. Wien 1897. Seite 200.

die das Gestein lockern; ebenso wirken die Wurzeln der Vegetation. — Auf horizontaler Ebene oder im Hügellande bleiben die Produkte der Verwitterung an Ort und Stelle liegen, sie bilden eine Schicht, die vor tiefer gehender Verwitterung schützt. Im Gebirge dagegen sind die Gehänge zu steil. Die Verwitterungsprodukte verlieren den Zusammenhang, sie rutschen ab, häufen sich am Fuße des Hanges zu Schutthalden an. Ist eine Eigenbewegung durch die Schwerkraft bei weniger geneigten Flächen nicht möglich, so kommt die abspülende Kraft des Regenwassers zu Hilfe; sie entfernt das Verwitterungsmaterial von den Gipfeln nnd Hängen.

„Das Werk der Abspülung sind die Blockmeere oder Felsenmeere der Granatgipfel. Indem sie die Produkte der Verwitterung fortschafft, den unversehrten Kern der einzelnen Blöcke aber liegen läßt, gestaltet sie ein ursprünglich kompaktes Gestein in ein Haufwerk von lose aufeinander getürmten Blöcken um." *) Sind die Gipfelformen steil, so ist die abtragende Kraft des Regens besonders stark, denn die Transportkraft nimmt ja mit der Geschwindigkeit im Quadrat zu. „So sind alle Gebirge der Schauplatz einer verhältnismäßig beträchtlichen Denudation, weil hier die großen Höhenunterschiede benachbarter Punkte unmittelbar oder mittelbar eine namhafte Steigerung der Transportkräfte verursachen. Je größer die relativen Höhen einer Landschaft sind, desto rascher wird diese vermöge der Zunahme der Transportkräfte denudiert werden. Die Größe der Denudation wächst mit den Höhenunterschieden; sie ist in den Ebenen sehr klein und erhält im Hochgebirge ihren stattlichsten Betrag." **) Auf diese Weise werden durch die Fortschaffung des gesamten verwitterten Materials von den Gipfeln feine Spitzen und Grate des unverwitterten oder resistenteren Gesteins herausgearbeitet. So sind z. B. auf den runden kahlen Rücken des Riesengebirges in den sonderbarsten Formen ganz vereinzelte über 30 m hohe zerrissene Steine und Pfeiler (z. B. Mittag- und Mädelsteine) als widerstandsfähigere Reste einer Granitmasse stehen geblieben.

Das von den Gipfeln und Gehängen vom Regen herabtransportierte Material wird auf dem Weg zur Tiefe des öfteren umgelagert und verändert. „Tritt ein heftiges Regenwetter ein, dann werden nach wenigen Minuten alle die kleinen Rinnen, die unbedeutendsten Furchen wasserreich. — Da beginnen die Wildbäche ihr

*) E. Brückner: Die feste Erdrinde und ihre Formen. S. 200. 1897.
**) Albrecht Penck: Ueber Denudation der Erdoberfläche. 1887. Schriften des Vereines zur Verbreitung naturwissenschaftl. Kenntnisse. Wien. S. 435.

Spiel, sie graben die Sohle ihrer Schluchten tiefer ein, unterwühlen die Gehänge, sodaß diese nachgleiten müssen. —

Noch mehr Verheerungen richten sie aber in den Gebieten an, wo sie, weil das Gefälle und damit ihre Geschwindigkeit abgenommen hat, einen großen Teil des mitgerissenen Materials wieder ablagern müssen." *)

Wir lernen hier die doppelte Wirkung des abrinnenden Regenwassers kennen; durch die eine wird die Transportbahn vertieft, durch die andere kommt es zur Ablagerung der mitgeführten Gerölle bei geringerem Böschungswinkel. Auf diese Weise wirkt die abspülende Kraft des Regenwassers auf weniger geneigten Flächen wieder ausgleichend. Neben dieser Eigenschaft wirkt die indirekte Regenwirkung auch noch formenausgleichend durch die Bodenbewegungen, die durch die Durchfeuchtung, wie wir gesehen haben, hervorgerufen wird. Durch sie findet bei langsamen Wirken eine Verminderung des natürlichen Böschungswinkels statt und wird die Herausbildnng einer gleichsinnigen Abdachung erstrebt. Aber auch das Gegenteil kann durch sie sehr leicht eintreten, indem Unregelmäßigkeiten an sonst ausgeglichenen Formen hervorgerufen werden.

Infolge der chemischen Regenwirkung werden, wie schon erwähnt wurde, allgemein die leichter löslichen Gesteine mehr angegriffen als die schwer löslichen. Die verschiedene Widerstandsfähigkeit der Gesteine verursacht daher mannigfaltige Formen einer Landschaft; sie hängen ab von der Art der Verteilung der Gesteinsunterschiede. **) „Liegen diese Schichten horizontal, so werden die leicht löslichen Gesteinspartien chemisch vom Regenwasser zersetzt und durch die mechanische Abspülung abgetragen; die schwer löslichen Schichten werden chemisch weniger angegriffen und nur durch das über sie hinweggespülte von den gelösten Schichten herrührende Material abgenutzt. ***) Es bilden sich treppenförmige Oberflächenformen heraus. Die nachgiebigen Schichten weichen schnell zurück; die widerstandsfähigeren brechen dann über den zerstörten Gesteinen ab, sodaß sie mehr durch Abbröckeln als durch Abspülung zurückweichen. †)

Bei senkrecht gestellten Schichten entstehen durch den Wechsel leichter und schwerer löslicher Schichten Rippen und Pfeiler, Erdpyramiden, Karren, Schratten usw. Auf ihre Beschreibung und

*) Heim: Einiges über die Verwitterungsform der Berge. 1874. S. 22.
**) Philippson: Allgem. Geogr. 2./2. Seite 39. 1924.
***) E. Bach: Ueber die morph. Bedeutung d. Regens. 1915. S. 13/14.
†) Philippson: Seite 39.

Entstehung soll wegen der reichlich vorhandenen Literatur nicht eingegangen werden.

„So ist der Einfluß der Gesteinsbeschaffenheit auf die Landformen sehr groß. Ist erstere einförmig, so ist es auch die Landschaft, wechseln verschiedene Gesteine häufig, so entsteht eine formenreichere Landschaft." *)

Wie wir gesehen haben, werden die Hochgebirge am raschesten abgetragen, da sie über die Baumgrenzen bis zu einer Temperatur hinausragen, in der ein häufiger Wechsel von Frost und Wärme stattfindet; die Verwitterung ist dann am größten. Die Oberflächepartien sind durch den Wald nicht geschützt, das Bodenmaterial wird leicht gelockert, die entstandenen Trümmer werden durch Wasser, Schnee und eigene Schwerkraft leicht verfrachtet. — In gebirgigen Gegenden wird die Abtragung weniger stark und je nach der Dichte der Vegetation verschieden stark sein. — In den Ebenen ist die Abtragung eine ganz geringe. — „Sind dieselben mit Vegetation bestanden, so werden sie durch allmähliche Auslaugung erniedrigt werden, was sehr langsam geschieht; sind sie dagegen nackt und kahl, so wird sich in ihnen auch die mechanische Zertrümmerung entfalten, allein zu derselben werden sich verhältnismäßig untergeordnete transportierende Kräfte gesellen." **)

Die Denudation strebt, ob sie schnell oder langsam vor sich geht, einem einzigen Ziele zu, das Land allmählich zu erniedrigen, bis es nur noch eine unbedeutende Höhe hat, die die Möglichkeit einer Abtragung auf ein ganz geringes Maß beschränkt. „Es strebt die Denudation dahin, das Land zu nivellieren, sie frißt an den Hochgebirgen und verwandelt dieselben in Mittelgebirge, sie nagt an letzteren und gestaltet sie schließlich in Flachländer um." ***)

Auf der Erde kann nach Walther Penck†) ein geneigtes Flächenstück, auf welches die Abtragung in irgendeiner Form wirkt, niemals steiler, sondern stets nur flacher werden. Dieses Prinzip der Abflachung ist das wichtigste Gesetz, dem die Entwicklung der Abtragungsformen gehorcht. — Es wird bei der Abflachung ein Stadium erstrebt, in dem die Denudation sehr klein oder gleich Null wird: das untere Denudationsniveau.

Nach Philippson††) erhalten wir in Trockengebieten und in Hochgebirgen einerseits und im feuchten Klima andererseits ver-

*) Philippson: Allg. Geogr. 2. Bd., 2. Heft, S. 40.
**) Alb. Penck: Ueber Denudation d. Erdoberfl. 1887. S. 439.
***) ebenda S. 440.
†) Walther Penck: Die morph. Analyse. 1924. S. 98.
††) Philippson: Allg. Geogr. 2. Bd., 2. Heft, S. 43. 1924.

schiedene Abtragungsformen. Bei der erstgenannten, wo die Wandverwitterung herrscht, erhalten sich die steilen Gipfel, indem die Wände langsam zurückweichen: „aus einem Klotzberge oder Tafelberg wird durch Annäherung der Wände ein steilwandiger Kamm, Pyramide oder Kegel. — In einem feuchten Klima mit vorherrschender Abspülung werden dagegen die Gehänge abgeflacht." Es entwickeln sich gewölbte Rücken mit runden Kanten, wie wir sie an den Pyramiden feststellen konnten, mit zunehmender Abflachung der Gehänge. „Eine Pyramide verwandelt sich in eine rundliche Kuppe; ist sie noch kantig, so bezeugt sie ihre Jugend." *) Es bilden sich auf allen Seiten gekrümmte Flächen heraus. Infolge der verschieden starken Abtragung auf den exponierten Seiten dürften die Neigungen der Flächen nie gleichmäßig stark sein. Es wäre sehr interessant zu erfahren, in welchem Maße sich die Abtragungsdifferenzen, wie wir sie im kleinen an unseren Pyramiden erhielten, an den Hängen der Gebirge geltend machen, d. h. wie sich die erhöhte Abtragung an den Ost- und Südseiten der Gebirgshänge zeigen. —

Zum Schluß sei noch einmal die „abtragende Kraft des Regens" in kurzen Worten zusammengefaßt:

Wir haben die mannigfaltigen Formen des morphologischen Wirkens des Regens kennen gelernt: Zunächst galt es, den einzelnen Regentropfen zu betrachten, wie er sich dem verschiedenen Bodenmaterial gegenüber verhält, und welche Formen er durch seine Einwirkungen ihm aufzwingt. Analog der Wirksamkeit des einzelnen Regentropfens zeigt sich die abtragende Wirkung eines Regens. Bei jedem Regenfall findet eine Formveränderung des festen Mediums statt, die je nach der Stärke und Art des Regenfalles verschieden groß ist: eine Durchfeuchtung des Bodens, ein Verschlämmen, oder eine Abtragung des Bodenmaterials. Die Abtragung oder Abspülung vollzieht sich wieder auf verschiedenen Wegen, je nach der Form des Wasserabflusses, flächenhaft oder rinnenhaft. — Die typische Erscheinung des Regenabflusses ist die Ausbildung der Regenrillen; sie werden, wie die Versuche ergaben, durch Unregelmäßigkeiten der beiden Medien geschaffen. Ein gleichmäßig aufgebauter Hang läßt bei regelmäßigem Einfall der Regentropfen keine Regenrillen entstehen. —

Die Hänge werden, wie die Messungen und Beobachtungen an den Pyramiden ergaben, keineswegs im gleichen Mengenverhältnis abgetragen. Jedoch stellt sich in der Anordnung der am

*) Philippson: Allgem. Geogr. 2. Bd., 2. Heft, S. 44. 1924.

meisten oder am wenigsten abgetragenen Flächen eine markante Gesetzmäßigkeit heraus: Die Ost- und Südseiten unterliegen einer größeren Abspülung als die Nord- und Westseiten, obwohl letztere stärker beregnet werden. Die Anordnung mit abnehmender Stärke ist folgende: 1. die Ost-, 2. die Süd-, 3. die Nord- und 4. die Westseite. — Allgemein ist die Abspülung von den Faktoren: Neigung des Hanges, Exposition, Bodenart und Gesteinsbeschaffenheit, Vegetationsdecke und Häufigkeit und Stärke der Niederschläge bedingt. Die größte Bedeutung kommt der Exposition eines Hanges zu. Sie stellt zusammen mit der Inklination den Maßstab dar für die Größe der Beregnung einerseits, für die Größe der Belichtung, Erwärmung und für den sich daraus ergebenden Feuchtigkeitszustand eines Bodens andererseits. Der Feuchtigkeitszustand eines Bodens ist wiederum maßgebend für die Größe der Abtragung; er bestimmt zunächst den Gegensatz der größeren Ost-, Süd- und der geringeren Nord-West-abtragungsmengen, da trockener Boden leichter abtragbar ist. Die nördlichen und westlichen Flächen erwiesen sich durchweg als die feuchtesten Flächen der Pyramiden. — Der Feuchtigkeitszustand ist aber nicht allein für die Größe der Abtragung maßgebend, sonst müßte die trockenere Südseite und die weniger feuchte Westseite eine geringere Menge Abtragungsmaterial aufweisen als die feuchtere Ost- bezw. Nordseite. Erklärt werden diese Differenzen, wie die Untersuchungen ergaben, durch die Tätigkeit des Windes, der vor einem Regen die südlichen und westlichen Flächen stärker angreift als die Ost- und Nordflächen und so einer starken Abtragung durch den Regen entgegen wirkt.

Die durch die abtragende Kraft des Regenwassers entstandene Form der Pyramidenflächen erwies sich in ihren Anfangsstadien als Konvex. Eine prägnante Erscheinung bildete die Einbuchtung auf den Flächen, die durch die Verschiedenheit der Feuchtigkeitsverteilung im Boden und deren Wirkung auf die Abtragung erklärt wurde. — Viele Faktoren sind an der Umgestaltung der Erdoberfläche tätig und rufen je nach ihrer Stärke, nach der Bodenbeschaffenheit des Erdbodens, des Klimas ungleich große und verschiedene Formen hervor. Durch die abtragende Kraft des Regens werden je nach dem Böschungswinkel steile oder sanfte Formen geschaffen.

Tabelle 3.

## Abtragungen durch Regen. (Pyramiden.)

| Datum | Regen | | Wind | | abgetragener **Sandboden** in g | | | | abgetragener **Lehmboden** in g | | | | Zustand des Bodens **vor** dem Regen | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Menge in mm | Art | Richtung | Stärke | Nord | West | Süd | Ost | Nord | West | Süd | Ost | | |
| 29. 8. | 0,3 | Sprüh | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | trocken | Sämtliches Regenwasser sickerte infolge Trockenheit des Bodens ein. |
| 10. 9. | 2,1 | Gew. | W | — | — | — | — | — | — | — | — | — | „ | |
| 11. 9. | 2,0 | „ | W | — | — | — | — | — | — | — | — | — | „ | |
| 12. 9. | 1,9 | „ | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 18. 9. | 4,6 | Schauerregen | W | gering | 39,5 | 34,5 | 41,0 | 49,5 | 13,0 | 11,5 | 16,0 | 19,5 | trocken | Große Abtragung: Trockenheit des Bodens. |
| 20. 9. | 16,5 | Land | W-NW | „ | 48,0 | 25,0 | 82,0 | 86,5 | 34,5 | 32,5 | 38,0 | 41,0 | feucht | verhältnismäss. geringe Abtrag. Grund.: Landr., k. Wind, Feucht. |
| 24. 9. | 1,2 | Schauerregen | W | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Kein Abfluß des Regenwassers. |
| 27. 9. | 6,1 | Land | N | gering | 7,0 | 4,5 | 11,5 | 12,5 | 6,0 | 4,5 | 5,0 | 6,0 | trocken | Schwache Abtrag.: Landregen |
| 2.10. | 6,6 | Gew. | W | stark | 37,0 | 65,0 | 42,0 | 68,0 | 39,0 | 38,5 | 32,0 | 28,0 | „ | Starke Abtrag.: Gewitterregen |
| 10.10. | 1,1 | Schauerregen | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| 17.10. | 4,8 | Land | Ost | gering | 27,0 | 7,5 | 32,0 | 46,0 | 18,5 | 17,0 | 19,5 | 22,0 | trocken | |
| 18.10. | 8,6 | Gew. | W | stark | 41,5 | 45,5 | 43,0 | 49,5 | 28,0 | 30,5 | 36,5 | 38,5 | feucht | |
| 19.10. | 4,1 | „ | W | „ | 22,5 | 22,0 | 21,5 | 23,5 | 17,5 | 13,0 | 14,5 | 16,0 | „ | |
| 22.10. | 7,4 | Land | NW | | 21,0 | 19,5 | 23,5 | 25,0 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 7,5 | trocken | Geringe Abtrag.: Landregen! |
| 23.10. | 3,3 | „ | W | | 14,5 | 13,5 | 16,0 | 15,5 | 3,0 | 2,5 | 3,0 | 4,5 | feucht | |
| 25.10. | 4,5 | Schauerregen | Ost | sehr gering | 18,5 | 16,0 | 20,5 | 22,5 | 7,5 | 6,5 | 9,0 | 11,5 | „ | Geringe Abtragung: vergl. 18. 9. |
| | **75,1** | | | | **276,5** | **253,0** | **333.0** | **398,5** | **172,0** | **162,0** | **179,5** | **194,5** | | |
| | | | | | 3. | 4. | 2. | 1. | 3. | 4. | 2. | 1. | | |

# Literatur-Verzeichnis.


E. Bach: Ueber die morphologische Bedeutung des Regens. Erlangen 1915.
Blanck: Handbuch der Bodenkunde. 1930.
R. Börnstein: Leitfaden der Wetterkunde. 1913.
Braun: Ueber Bodenbewegungen. 2. Teil. 1. Bericht der Geographischen Gesellschaft Greifswald 1908.
E. Brückner: Die feste Erdrinde und ihre Formen. Wien 1897.
Defant: Die Größe der Regentropfen. Met. Zt. 22. 1905.
Descombes: Der Einfluß der Bewaldung auf die Niederschläge. Ref. Zentralblatt f. d. ges. Forstwesen. 1921.
E. Ebermayer: Einfluß der Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit usw. Stuttgart 1900.
Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1901 (Ney).
Fritsch: Ein Beitrag zur Erklärung der Wanderung des Maximums der Bodentemperatur. Met. Zt. 1871.
R. Geiger: Das Klima der bodennahen Luftschicht. 1927.
R. Geßler: Die Stärke der unmittelbaren Sonnenstrahlung der Erde in ihrer Abhängigkeit von der Auslage unter verschiedenen Breiten. Abhdl. d. Pr. Met. Inst. 8. 1925, Nr. 1.
G. Götzinger: Beiträge zur Entstehung der Bergrückenformen. Geogr. Abhdl. Bd. 9, Heft 1. Leipzig 1907.
Gravelius: Flußkunde. Berlin und Leipzig 1914.
J. Hann: Lehrbuch der Meteorologie. 4. Aufl. Leipzig 1926.
J. Hann: Handbuch der Klimatologie. 1. Bd. Stuttgart 1908.
Heim: Einiges über die Verwitterungsformen der Berge. 1874. Neujahrsblatt der naturf. Ges. in Zürich.
A. Hettner: Die Oberflächenformen des Festlandes, ihre Untersuchung und Darstellung. Leipzig u. Berlin 1921.
Hoppes u. Bühler: Mitt. d. forstl. Vers.-Wes. Oesterreichs. 1896. 21. Heft.
Th. A. Jaggar: Experiments illustrating Erosion and Sedimentation. Bull. Mus. of Comp. Zool. Bd. 49 — Geol. Serv. Bd. 8 Nr. 6. 1908.
H. Kaufmann: Rhytmische Phänomene der Erdoberfläche. Bonn 1928.
H. Keller: Die Abflußerscheinungen in Mitteleuropa. Geogr. Zt. 1906.
A. Kerner: Ueber Wanderung des Maximums der Bodentemperatur. Met. Zt. 1871.
Köppen: Met. Zt. 1889. 6. S. 114.
Lautensach: Allgemeine Geographie 1928.
O. Lehmann: Ueber die Bewegungsenergie des Regenwassers. Zeitschr. f. Geomorphologie 6. 1930. Heft 1.
P. Machatschek: Geomorphologie 1919.
Met. Zt. 1904 (Lenard).
E. Obst: Grundzüge einer geogr. Landeskunde. Hamburg 1923.
S. Passarge: Die Grundlagen der Landschaftskunde. 1920.
A. Penck: Morphologie der Erdoberfläche. Stuttgart 1914.
A. Penck: Die Denudation der Erdoberfläche. Wien 1887. Schriften zur Verb. naturw. Kenntnisse.

W. Penck: Die morphol. Analyse. 1924.
A. Philippson: Grundzüge der Allgem. Geogr. — Bd. 2 Morph. 1924. 2. Hälfte.
R. Pilger: Pflanzengeographie. Stuttgart 1913. III. Das Leben der Pflanze.
E. Ramann: Bodenkunde. 1905.
W. Rieger: Mitt. a. d. forstl. Vers.-Wes. Oesterr. 2. Bd., 2. Heft, S. 201.
W. Schmidt: Zusammenfließen der Regentropfen. Met. Zt. 25. 1908.
Schmitthenner: Die Oberflächenformen der Stufenlandschaft zwischen Maas und Mosel. Geogr. Abhdl. 1923. 2. Reihe, Heft 1.
Schmitthenner: Die Entstehung der Dellen und ihre morph. Bedeutung. Zt. f. Geomorph. 1925.
Schwalbe: Ueber Niederschlagstypen und ihren Einfluß auf die jährliche Periode des Niederschlags. Met. Zt. 1907.
Schubert: Wald und Niederschlag in Schlesien. 1904.
Stratil-Sauer: Der Erdschlipf im Lewiner Ländchen. Dissert. Auszug Breslau 1922.
Stratil-Sauer: Die Tilke. Zt. f. Geomorph. 1930. Bd. 4, Heft 1.
Supan: Grundzüge der physikalischen Erdkunde. 1930. Band II, Teil 1.
Süring (F. Lincke): Niederschlagsmessungen unter Bäumen. Met. Zt. 1916.
W. Ule: Theoretische Betrachtungen über den Abfluß des Regenwassers. Zeitschr. f. Gewässerkunde 1906, 7.
J. Wiesner: Beiträge zur Kenntnis des tropischen Regens. Sitz.-Ber. der Akad. d. Wissensch. Wien C 4 1895. Bd. 104, Abt. 1.
Wollny: Forschungen der Agrik.-Physik. 1895. 12/13.

# Lebenslauf.

Am 21. Juli 1909 wurde ich, Hellmuth Theinert, als Sohn des jetzigen Oberlandjägermeisters, Lt. a. D. Richard Theinert und seiner Ehefrau Martha geb. Hollburg in Slupna b. Myslowitz geboren. Ich besitze die Staatsangehörigkeit von Preußen und bin katholischer Konfession. — Das Abiturienten-Examen legte ich Ostern 1929 am Realgymnasium in Striegau (Schles.) ab. Die ersten Semester verbrachte ich in München, Breslau und Graz. Ab Sommer-Semester 1931 setzte ich mein Studium an der Universität zu Rostock fort.

Herrn Professor Dr. W. Ule spreche ich für die vielen Anregungen, die ich durch ihn erhalten habe, und für das stete Interesse, das er meiner Arbeit entgegenbrachte, meinen ganz ergebenen Dank aus.

## Druckfehler-Berichtigungen.

Seite 14 muß es heißen: Gehängeschutt statt Gehängeschutz
„ 63 „ „ „ Steigerung statt Steigung.